

## شبیه‌سازی عددی پروفیل تغییر شکل ورق مثلثی تحت انفجار مخلوط گازی

مجتبی حقگو<sup>۱</sup>، هاشم بابایی<sup>۲\*</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

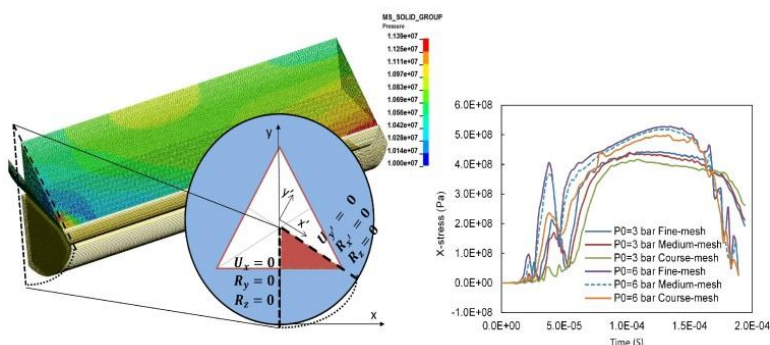
<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران

### برجسته‌ها

- استفاده از روش اویلری برای سیال و فرمول‌بندی لاگرانژی برای جامد
- تعامل کوپل‌شده بین امواج انفجار و سطح ورق
- افزایش تغییرشکل با مقدار پیش‌فشار بیشتر و مکان نقطه اشتعال نزدیک‌تر

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷

\*نویسنده مسئول:

ghbabaei@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

ورق مثلثی

انفجار گازی

شبیه‌سازی عددی

روش مرز غوطه‌ور

### چکیده

یک مطالعه عددی پیشرفته حاوی تعامل سیال و جامد بر اساس روش مرز غوطه‌ور برای بررسی تأثیر فشار پیش‌انفجار و بازه زمانی تغییرشکل پلاستیک ورق‌های مثلثی نازک تحت انفجار گازی انجام می‌شود. سایر اهداف شبیه‌سازی عددی مانند محاسبه تغییرشکل و کانتور تنش ماده در نرخ کرنش زیاد بر اساس مدل مادی جانسون-کوک وابسته به نرخ کرنش به دست می‌آیند. شبیه‌سازی بر اساس مدل‌سازی انفجار با سینتیک واکنش شیمیایی و بهره بردن از حلگر CESE برای گسترش انفجار انجام می‌شود. روش مرز غوطه‌ور برای شبیه‌سازی حرکت سطح میانی بین گاز منفجرشده و ورق تغییرشکل یافته از محاسبه پخش‌شدگی فشار سیال بر سطح ورق استفاده می‌کند. ابزار عددی با بهره بردن از معادلات اویلری واکنش چند جزئی و معادله لاگرانژی ورق، پخش‌شدگی فشار و پارامترهای انفجار گازی را به تغییرشکل ماکروسکوپی ورق مرتبط می‌کند. روش عددی به‌عنوان یک ابزار مناسب در محاسبه پروفیل تغییرشکل ورق مثلثی مبین کاهش تغییرشکل با اندازه کوچک‌تر سطح بدون پوشش ورق است.

## ۱- مقدمه

بررسی تأثیر بارگذاری سریع بر شکل دهی ورق در سال های اخیر توجه زیادی را جلب کرده است. توانایی شبیه سازی عددی این نمونه ها می تواند ابزار مؤثری را در تحلیل و بررسی اثر انفجار بر این ساختارها فراهم آورد. اکثراً، این اجزا دارای طراحی پیچیده و بارگذاری نامنظم هستند [۱ و ۲]. به کارگیری روش های کلاسیک موجود، منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده با شرایط مرزی و شرایط اولیه متنوع می شود. با توجه به غیرممکن بودن حل این معادلات تحلیلی، از روش های عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستم ها استفاده می شود [۳ و ۴]. دقت روش المان محدود به دقت محاسبه ی تغییر شکل و تنش های بخشی از ورق که بر اثر بار ضربه ای تغییر شکل پیدا می کند و تأثیر خواص مواد بستگی دارد [۵].

روش های عددی پیشرفته برای پیش بینی دقیق پاسخ دینامیکی یک سازه در معرض بارگذاری ضربه ای مورد نیازند [۶]. یکی از روش های عددی برای این دسته از مسائل، روش غیر کوپل شده است. این روش از شبیه سازی عددی برای پیش بینی انتشار موج و پخش شدگی فشار درون مرز صلب سیال استفاده می کند [۷]. نادیده گرفتن تعامل سیال و جامد منجر به تجزیه و تحلیل کوپل نشده می شود که در ابتدا با محاسبه بارهای انفجار به گونه ای که گویی ساختار صلب است آغاز و سپس با اعمال بار انفجار به مدل تغییر شکل ورق به عنوان شرایط مرزی انجام می شود [۸].

این روش، شبیه سازی به صورت مجزا، فرآیند بارگذاری انفجاری را در زمانی متفاوت از تغییر شکل سازه شبیه سازی می کند. در این نوع تحلیل، بارهای فشاری اغلب به دلیل نادیده گرفتن تغییر شکل ساختاری صفحه، بیش از حد محاسبه می شوند [۹ و ۱۰]؛ بنابراین، مدل های شبیه سازی عددی برای مطالعه فیزیک کاربردی موجود در چنین مسائلی مورد نیاز هستند. در این روش، سایر ویژگی های سیال مانند چگالی و دما هم در روش المان محدود ساختاری برای ارزیابی رفتار دینامیکی سازه بکار گرفته می شوند. روش کوپل نشده از فرضی اساسی استفاده می کند که انتشار موج شوک تحت تأثیر حرکت ساختاری قرار نگرفته است. این فرض محافظه کارانه ساده کننده، فشار

واقعی را در مقادیر زیادتر، دست بالا می گیرد [۱۱]. با توجه به رفتار غیر خطی ذاتی سازه های تحت بارگذاری ضربه ای از نظر خواص مواد و مشخصات هندسی، روش کوپل نشده ممکن است روش مناسبی نباشد و می تواند بر درستی پاسخ فیزیکی پیش بینی شده سازه تأثیر بگذارد. باین حال، اثرات متقابل سیال و جامد می تواند به طور قابل توجهی هم بر انتشار موج شوک و هم بر رفتار فیزیکی ساختاری تأثیر بگذارد، اما اکثر مطالعات قبلی فاقد این ویژگی مهم بودند و همچنین تعامل سیال و سازه کوپل نشده آن ها با دینامیک واکنش شیمیایی همراه نبود [۱۲ و ۱۳].

بر اساس توضیحات فوق، می توان نتیجه گرفت که روش تجزیه و تحلیل کوپل نشده برای مطالعه رفتار الاستو پلاستیک صفحات فلزی تحت بارهای انفجار مخلوط، تأثیر تعامل سیال و جامد را نادیده می گیرد. روش شبیه سازی عددی، فرآیند انفجار گاز را در حالی که ساختار صلب است محاسبه می کند. پس از آن، برای ارزیابی تغییر شکل پلاستیک سازه، بار فشاری به عنوان یک شرط مرزی خارجی به سازه اعمال می شود. در بیشتر تحقیقات گزارش شده در گذشته، تغییرات فشار-زمان اندازه گیری شده در آزمایش ها توسط مدل تیلور-زلدویچ به عنوان مدل فشار در نظر گرفته شد [۱۴ و ۱۵]. نقص اصلی این روش این است که منحنی فشار-زمان به درستی زمانی که سازه دچار شکست می شود را اندازه گیری نمی کند.

از سوی دیگر، اثر تعامل سیال و سازه در تجزیه و تحلیل کوپل شده در نظر گرفته می شود که بسیار نزدیک به واقعیت بارگذاری انفجار مخلوط گازی بر تغییر شکل سازه است [۱۶]. اگر تعامل بین موج انفجار ناشی از واکنش شیمیایی و ساختار در نظر گرفته شود، شبیه سازی عددی به یک مسئله بسیار چالش برانگیز برای محققان تبدیل می شود. تحقیقات محدودی در سال های اخیر در مورد تجزیه و تحلیل کوپل شده انجام شده است و اغلب این اثر در طول فرآیند شکل دهی به دلیل پیچیده بودن، در تعریف تعامل سیال و جامد به طور کامل نادیده گرفته می شود.

از این رو، برای شبیه سازی عددی پاسخ صفحات فلزی در معرض بارگذاری انفجار گازی مخلوط اکسیژن هیدروژن و به طور خاص تر، برای مدل سازی بار فشاری اعمال شده بر

نرم‌افزار ANSYS انجام دادند. آن‌ها مدل‌های محاسباتی دوبعدی و سه‌بعدی را با هر دو تحلیل دینامیک صریح و ضمنی انجام دادند. آن‌ها اثرات فشار انفجار و پارامترهای طراحی قالب را بر تولید جام آلومینیومی بررسی کردند. آن‌ها در نهایت فشار انفجار بهینه را به‌عنوان حداکثر فشار فرآیند که در آن جام آلومینیومی بدون نقص تولید می‌شود، شناسایی کردند.

خو و همکاران [۲۳] بر اساس کوپلینگ الگوریتم‌های اختیاری-لاگرانژی-اویلری (ALE) و المان محدود (FE) و با در نظرگیری ویژگی‌های سیالی یک گاز منفجره و ویژگی‌های مکانیکی یک سازه یک مدل عددی برای شبیه‌سازی فرآیند دینامیک انفجار گاز طبیعی در یک تونل شهری ارائه کردند. پاسخ دینامیکی تونل با تحلیل فشار، جابجایی، سرعت و تنش مؤثر سازه بررسی و مشخص کردند که افزایش نشت گاز و کاهش ابعاد فضا، فشار انفجار، سرعت انتشار و تنش مؤثر وارد بر تونل را افزایش می‌دهد. با مطالعه مکانیسم انتشار موج انفجاری، رفتار مکانیکی سازه و تأثیر نشت گاز، گزارش کردند که زمانی که انفجار گاز در تونل تأسیسات شهری رخ می‌دهد، موج انفجار از منبع احتراق به محیط اطراف در امتداد جهتی که تونل در آن قرار می‌گیرد، منتشر می‌شود. فشار موج انفجار ابتدا به‌سرعت افزایش می‌یابد و سپس به‌تدریج از بین می‌رود. علاوه بر این، فشار در موقعیت نزدیک به منبع احتراق در مرحله اولیه بیش‌ترین مقدار را دارد که پس‌از آن به‌تدریج کاهش می‌یابد. با بررسی فشار، جابجایی، سرعت و تنش مؤثر تونل، عنوان کردند که نواحی تنش فشاری و کششی به‌طور متناوب در ساختار توزیع شدند و نقاط بحرانی ساختار در گوشه‌های داخلی و دیوارهای خارجی تونل واقع شدند.

رخی و صوری [۲۴] شبیه‌سازی عددی شکل‌دهی صفحه فلزی توسط انفجار گازی مخلوط استوکیومتری هیدروژن و اکسیژن را بررسی کردند. آن‌ها حلگر المان بقا المان حل روش مرز غوطه‌ور را برای یافتن مجهولات معادلات جریان واکنشی، شامل ۱۶ واکنش، بکار گرفتند. آن‌ها از یک مدل شیمی با سرعت محدود برای فراهم کردن همه شرایط ضروری معادله واکنش برای حل‌کننده CESE استفاده کردند. آن‌ها تعامل فصل مشترک سیال-سازه را با استفاده از

روی سطح ورق، روش المان حل المان بقا فضا-زمان<sup>۱</sup> (CESE) در کد تجاری LS-DYNA در ارتباط با روش مرز غوطه‌ور<sup>۲</sup> (IBM) به‌جای استفاده از تغییرات فشار-زمان اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها با مدل تیلور-زلودویچ<sup>۳</sup> گره‌گشا است [۱۷ و ۱۸].

در دهه‌های اخیر، مطالعات مربوط به انفجار در سیلندر انفجاری توسط محققان برای ساخت ورق‌های شکل‌گرفته انجام شده است. این مطالعات بر تأثیر انفجار داخلی بر تغییر شکل ورق تعبیه‌شده بر یک دیواره مرزی سفت‌وسخت متمرکز شده‌اند. هنگامی که ورق دیگر نمی‌تواند به دلیل بارگذاری انفجاری مقاومت کند، به‌صورت پلاستیکی تغییر شکل می‌دهد.

به علت ناکارآمدی راه‌حل‌های تحلیلی در این نوع مطالعات، شبیه‌سازی عددی ضروری است. روش‌های تحلیلی قادر به مدل‌سازی چنین انفجار گازی خودپایدار<sup>۴</sup> با ساختارهای وابسته به زمان نیستند. تنها روش‌های عددی می‌توانند یک شبیه‌سازی واقعی از دخالت پارامترهای مختلف، مانند نیروهای دینامیکی انفجار گاز، تفکیک امواج شوک سه‌گانه پیشرو -ماخ-عرضی، شیمی انفجار، مقیاس‌های زمانی مختلف برای دینامیک سیال جنبشی-شیمیایی و جداسازی گازهای واکنش داده و واکنش نداده را بر حداکثر جابجایی صفحه تحت بارگذاری انفجار گازی داخلی را نشان دهند [۱۹-۲۱].

تجزیه و تحلیل کوپل شده انفجار گازی که با روش‌های عددی انجام می‌شود، کار دشواری است و مقالات مرتبط کمیاب هستند. علاوه بر این، انجام آزمایش‌های خوب با چنین پیچیدگی، بدون دخالت سناریوهای شبیه‌سازی عددی از استدلال پذیری فاصله دارد؛ بنابراین، هدف از این بخش، مرور مطالعات مرتبط در مورد شکل‌دهی انفجاری مخلوط گازی از دیدگاه عددی است. یاشار و همکاران [۲۲] یک فن‌آوری شکل‌دهی انفجار گازی را برای شکل‌دهی جام‌های استوانه‌ای آلومینیومی با همراهی مدل عددی توسعه دادند. آن‌ها همچنین یک مدل‌سازی المان محدود را با استفاده از

<sup>1</sup> Space-time conservative element solution element method

<sup>2</sup> Immersed boundary method

<sup>3</sup> Taylor-Zeldovich model

<sup>4</sup> Self-sustained gaseous detonation

آن‌ها گزارش کردند که FSI می‌تواند منجر به کاهش بار انفجار بر روی یک ساختار صفحه‌دار انعطاف‌پذیر شود. آن‌ها اعلام کردند که روش کوپل‌نشده، برای شدت‌های انفجار کوچک‌تر صفحات فولادی نازک گیردار کاربردی‌تر است و پیش‌بینی‌های محافظه‌کارانه‌تری را برای شدت‌های انفجار بزرگ‌تر فراهم می‌کند. در نهایت بر اهمیت شبیه‌سازی‌های FSI کاملاً کوپل‌شده برای به دست آوردن پیش‌بینی‌های کمی و کیفی در دامنه فشار زیادتر بارگذاری انفجار صحنه گذاشتند.

رخی و مستوفی [۲۷] شبیه‌سازی تکاملی پاسخ دینامیکی لوله‌های آلومینیوم خالص را تحت بارگذاری انفجار داخلی مخلوط گاز با در نظر گرفتن حرکت سیال، واکنش شیمیایی و تعامل موج / سازه نشان دادند. شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی در یک حل‌کننده CESE تراکم‌پذیر با روش مرزی غوطه‌ور انجام شد و با نتایج تجربی لوله آلومینیومی شکل‌گرفته تحت بارگذاری انفجار هیدروژن و اکسیژن اعتبارسنجی شد. آن‌ها از مدل عددی معتبر برای بررسی اثر محل نقطه اشتعال، فشار اولیه و بارگذاری مکرر استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که بارگذاری انفجار گازی دوگانه در فشار اولیه پایین منجر به همان نتیجه به‌دست‌آمده برای بارگذاری منفرد در فشار اولیه متوسط شد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که توزیع یکنواخت زمانی به دست آمد که از یک نقطه اشتعال دوگانه استفاده شد، درحالی‌که الگوی تغییرشکل مطلوب زمانی به دست آمد که نقطه اشتعال در فاصله یک‌ششم از دو انتهای لوله تنظیم‌شده بود.

مطالعات عددی اندکی در مورد تجزیه و تحلیل شکل‌دهی انفجاری و اثر ویژگی‌های گازی مختلف بر توزیع فشار وجود دارد. اغلب اثرات این کمیت‌ها در دسترس نیستند و عدم لحاظ واکنش شیمیایی دقیق در بارگذاری انفجار گازی در طول فرآیند شکل‌دهی بر این کمبودها صحنه می‌گذارد؛ بنابراین بررسی دینامیک واکنش شیمیایی سیال و دینامیک فیزیکی غیرخطی سازه در یک تحلیل کنش سیال-سازه کاملاً کوپل‌شده ضروری است. به‌عنوان ادامه مطالعات قبلی و در نظر گرفتن مشکلات در شبیه‌سازی انفجار گازی، هدف این مطالعه بررسی الگوی تغییرشکل و مکانیسم شکست یک صفحه گیردار شده بر یک قاب مثلثی تحت انفجار داخلی و

روش مرز غوطه‌ور انجام دادند که فشار سیال را بر المان جامد به‌عنوان شرایط مرزی خارجی اعمال کرد و تغییرشکل و سرعت را بر صفحه از حل‌کننده ساختاری بازخورد داد. آن‌ها مکانیسم واکنش جنبشی کاهش‌یافته را برای تعیین ضرایب مربوط به مکانیسم کامل استفاده کردند و مشاهده نمودند که افزایش فشار اولیه مخلوط، فشار انفجار و جابجایی نقطه میانی صفحه را افزایش می‌دهد.

گواک و همکاران [۲۵] یک مطالعه عددی چند ماده‌ای را بر گسترش انفجار مخلوط گاز انفجاری برای مطالعه تغییرشکل پلاستیک بزرگ لوله مسی استوانه‌ای ضدزنگ با دیواره‌های نازک با ضخامت‌های مختلف تحت انفجار مخلوط گازهای اکسیژن هیدروژن و اتیلن انجام دادند. برای توصیف انفجار استوکیومتری، معادله حالت گاز ایده‌آل (EOS) همراه با یک مرحله واکنش شیمیایی Arrhenius استفاده شد. از استدلال مجموعه ذرات ترکیبی در فضای مشترک برای ردیابی دقیق تعامل بین صفحه جابه‌جاشده و گاز منفجرشده استفاده کردند. آن‌ها دینامیک رفتار پلاستیک لوله‌های نازک با ضخامت‌های مختلف را با در نظر گرفتن کنش موج شوک با فلز توسط معادله حالت Mie-Grunesen و مدل مادی جانسون-کوک انجام دادند. آن‌ها از روش سیال تجسم برای بررسی حرکت سطح مشترک بین موج شوک و دیواره انحراف یافته لوله استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که درحالی‌که حداکثر فشار یک لوله ۰/۲ میلی‌متری با قطر داخلی ۴ میلی‌متر تقریباً ۰/۴ مگا پاسکال بود، لوله ۰/۱۲ میلی‌متری، فشار و چگالی کمتری را به دلیل تغییرشکل لوله و افزایش کرنش پلاستیک مؤثر تجربه کرد.

آوون و همکاران [۲۶] نتایج حاصل از یک بررسی عددی بر تأثیر کنش سیال-سازه (FSI) بر پاسخ دینامیکی صفحات نازک فولادی در معرض بارگذاری انفجاری را ارائه دادند. با اعمال بارگذاری توسط یک لوله شوک، صفحات فولادی دارای سطح مقطع ۰/۳ مترمربع را خمیده کردند. آن‌ها با اجرای شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از کد المان محدود، یک روش FSI کوپل‌نشده را برای بررسی اثرات FSI استفاده کردند. آن‌ها با مشاهده افزایش اثر FSI با افزایش شدت انفجار و انطباق خوب با داده‌های تجربی، اطمینان خود را از تغییر مکان‌ها و سرعت‌ها در صفحات فولادی اعلام کردند.

$$\frac{\partial(au)}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(au)}{\partial x_1} + \frac{\partial u}{\partial x_2} = 0, \text{ or } \nabla \cdot \bar{h} = 0, \bar{h} = \begin{pmatrix} au \\ u \end{pmatrix} \quad (2)$$

با یکپارچه‌سازی حجم دلخواه با استفاده از قضیه اختلاف گوس در 2E، می‌توان معادله تعادل شار فضا-زمانی را به دست آورد [۲۹].

$$\int \nabla \cdot \bar{h} dV = \oint \bar{h} \cdot d\bar{s} = 0 \quad (3)$$

شار فضا-زمانی از المان‌های سطحی عبور می‌کند. در اینجا، تمام عملیات ریاضی بر فضاهای دوبعدی معمولی انجام می‌شود. تفاوت اصلی بین این روش و روش دیگر، زمان و مکان واحد است.

هدف اصلی این بخش، مدل‌سازی دقیق شکل‌دهی انفجار گازی با ترکیب سیستم‌های معادله حاکم با مدل شیمی با استفاده از مکانیسم‌های دقیق واکنش است. مکانیسم احتراق هیدروژن/اکسیژن را می‌توان بر اساس مکانیسم دقیق ارائه‌شده توسط ایوانز و همکاران ارائه کرد که شامل ۷ گونه واکنش‌دهنده ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $HO_2$  و  $H_2O$ ) و ۱۶ واکنش است. این مکانیسم دقیق شامل تمام گونه‌های مهم در انفجار گاز هیدروژن/اکسیژن است [۳۰].

مخلوط با مشخص کردن یک منطقه شروع دمابالا به شکل نیم کره با شعاع ۳ میلی‌متر مشتعل می‌شود. دمای این ناحیه آغاز ۲۵۰۰ کلوین است. آغاز انفجار در یک مخلوط گازی با مشخص کردن یک منطقه با دمای زیاد به‌طور موفقیت‌آمیزی توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱، ۳۲]. از آنجاکه مطالعه پدیده احتراق به انتقال انفجار (DDT) موضوع اصلی این مطالعه نیست، دمای اولیه این منطقه بسیار زیاد در نظر گرفته شد تا فرآیند DDT را بسیار سریع کند. از آنجاکه شکل‌دهی با انفجار گازی یک رویداد دینامیکی با نرخ کرنش زیاد است، برای پیش‌بینی دقیق پاسخ یک قطعه کار، نرخ کرنش و نرم‌شدگی ماده ناشی از افزایش دمای آدیاباتیک مربوط به کار پلاستیک در تنش جریان باید در مدل‌های ساختاری گنجانده شود. در اینجا از مدل مادی جانسون-کوک استفاده می‌شود [۲۶، ۳۳]. زیرا این مدل مادی به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی شکل‌دهی فلز استفاده شده است و همچنین تمام

مطالعه تأثیر فشار پیش‌انفجار بر نمونه است. تأثیر ابعاد و شکل قید بر نحوه تغییر شکل ورق غیرقابل‌انکار است. استفاده از هندسه متفاوتی مانند مثلث برای قید در راستای ساخت سقف ماشین‌های آواربرداری برای انتقال مؤثر آوارهای به‌جامانده بر سقف ماشین اهمیت دارد. شبیه‌سازی عددی بر اساس فرمول‌بندی دینامیک صریح سه‌بعدی و مدل مادی جانسون-کوک برای در نظر گرفتن کرنش و نرخ سختی ماده استفاده شده است. داده تجربی برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی عددی انجام‌شده مورد استفاده قرار گرفته است. اثر شرایط اولیه شامل فشار پیش‌انفجار مخلوط گازی در داخل محفظه، موقعیت نقطه اشتعال و ظرفیت طولی محفظه احتراق با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مورد بحث قرار گرفته است. مطالعه حاضر درک تبادل انرژی بین موج شوک و صفحات نازک را با استفاده از یک ساختار لاگرانژی کوپل‌شده‌ی سیال اوپلری با یک حل‌کننده شیمی که قادر به محاسبه پارامترهای انفجار است را امکان‌پذیر می‌کند. مطالعه عددی با استفاده از LS-DYNA CESE-FEM با در نظر گرفتن FSI، اثر نرخ کرنش و غیرخطی بودن ماده را اعمال می‌کند. این مدل فرایند انفجار داخلی را به‌طور منطقی با شبکه ریز تحت شرایط اولیه مختلف شبیه‌سازی می‌کند که پیش‌بینی خوبی از فشار شوک با مدل واکنش شیمیایی دقیق می‌دهد. این مطالعه نتایج را برای مشخص کردن اثر ویژگی‌های انفجار گازی مانند فشار قبل از انفجار، نقطه انفجار و دمای اولیه گازها بر توزیع فشار در مخزن و در طول صفحه برای انفجار مخلوط استوکیومتری با سرعت بالا شامل یک مکانیسم کامل از هفت گونه و ۱۶ واکنش شیمیایی استخراج می‌کند.

## ۲- شبیه‌سازی عددی

فرآیند انفجار مخلوط گازی به‌طور کامل مدل‌سازی می‌شود و از مکانیسم سینتیکی شیمیایی چندمرحله‌ای کاهش‌یافته در شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش CESE (المان بقا/المان حل) بهره برده می‌شود. روش CESE با در نظر گرفتن یک PDE مطابق رابطه (۱) توصیف خواهد شد [۲۸] که در آن  $x$  و  $t$  به ترتیب زمان و مختصات مکان هستند و  $a$  یک ثابت است.

لاگرانژی کرنش صفحه‌ای مش‌بندی شده‌اند، درحالی‌که مخلوط هیدروژن-اکسیژن درون محفظه احتراق به‌وسیله المان‌های جامد اویلری مش‌بندی شده است. شرایط مرزی اعمال‌شده به مدل مشابه شرایط اعمال‌شده در آزمایش‌ها برای گیردار کردن ورق است. مرز ورق فولادی پوسیده‌شده توسط ساختار قاب و قالب شامل گره‌هایی است که در تمام محورهای انتقالی و چرخشی محدودشده‌اند. در تمام شبیه‌سازی‌ها، دیواره سیلندر با انبساط شعاعی صفر به‌اندازه کافی صلب فرض شده است. شرایط مرزی غیرانعکاسی در انتهای بسته و باز محفظه انفجار در نظر گرفته می‌شود تا شرایط مرزی غیرفعال برای جریان‌های تراکم‌پذیر CESE تعریف شود و بازتاب‌های سطحی موج فشار که تأثیر اندکی بر ساختار صفحه دارد را حذف کند. شرط مرزی دیوار صلب به سطح خارجی دیواره محفظه اعمال شد که یک مرز فیزیکی برای جریان ایجاد کند.

آغاز انفجار با یک روش مبتنی بر محاسبات یک‌بعدی بر اساس ترکیب شیمیایی و شرایط اولیه انجام می‌شود که شامل موقعیت جبهه انفجار در جهت انتشار امواج انفجاری، محدودیت زمانی برای شبیه‌سازی و تعداد المان‌ها با اندازه برابر است. از آنجاکه مخلوط گازی انفجار، امواج شوک یکنواختی را در سطح مقطع سیلندر ایجاد می‌کند، علاوه بر این منطقه پرفشار، یک ناحیه از گره‌های مسدودکننده نشان‌دهنده دیواره محفظه احتراق استوانه‌ای خواهند بود. یک صفحه پوسته‌ای و یک قاب جامد صلب هم از دیگر اجزای شبیه‌سازی هستند. این روش گسسته سازی FE برای CESE با امواج شوک، محفظه احتراق را به‌صورت یک مدل سه‌بعدی با اندازه المان ۰/۶ میلی‌متر در جهت محوری و ۰/۳ میلی‌متر در جهت شعاعی مش‌بندی می‌کند. سپس، گره‌های ساختاری مستقل از گره‌های سیال می‌توانند با حرکت از میان شبکه سیال ثابت رابط‌های FSI حل‌کننده CESE را فعال کنند و با استفاده از روش مستقیم سیال تجسم تحت کنترل قرار دهند. در نتیجه معادلات ساختاری سیال و جامد را می‌توان بدون نیاز به مش‌بندی مجدد به‌راحتی به‌صورت مستقل از یکدیگر حل نمود. این روش حل مبتنی بر محاسبه کوتاه‌ترین فاصله مرز سازه تا یک المان حل منفرد است. به‌طوری‌که بر اساس این فاصله، نقاط

داده‌های موردنیاز برای نمونه‌های آزمایشی در منابع در دسترس هستند.

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{pn}) \left( 1 + c \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left[ \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right]^m \right) \quad (4)$$

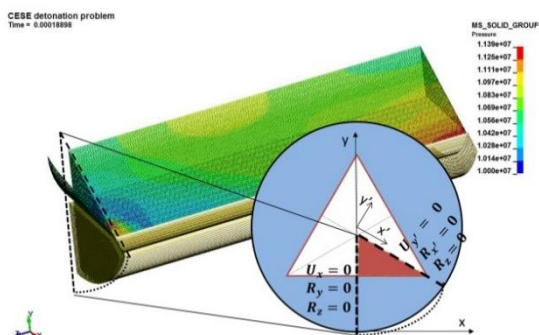
در معادله (۴)،  $\bar{\epsilon}^p$  کرنش پلاستیک مؤثر،  $\sigma_y$  تنش پلاستیک مؤثر،  $\dot{\bar{\epsilon}}^p$  نرخ کرنش پلاستیک و  $\dot{\epsilon}_0$  نرخ کرنش مرجع‌اند. ضرایب  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و توان  $m$  ثابت‌های ماده مربوط به ثابت تنش تسلیم، ثابت سخت‌شدگی کرنش، نفوذ ویسکوز و ثابت نرم‌شدن حرارتی می‌باشند. نمادهای  $n$  توان کرنش سختی،  $T$  دمای فعلی،  $T_r$  دمای اتاق و  $T_m$  دمای ذوب‌اند. مهم‌ترین نکته در استفاده از مدل ترموپلاستیسیته جانسون-کووک این است که همه مواد ممکن است از رابطه ریاضی ارائه‌شده در براکت اول معادله پیروی نکنند. این موضوع ممکن است خطاهای قابل‌توجهی در شبیه‌سازی عددی ایجاد کند. نکته مهم دیگر این است که براکت دوم اثر حساسیت نرخ کرنش ماده را بر اساس یک تابع لگاریتمی خطی در نظر می‌گیرد.

برای حل مسئله FSI در سیال تراکم‌پذیر، حل‌کننده CESE با حل‌کننده مکانیک جامد LSDYNA کوپل شده است. در حل‌کننده CESE-IBM FSI با دقت حل دوگانه LS-DYNA، حل‌کننده CESE برای حل معادلات سیال و برنامه FEM LS-DYNA برای حل معادلات ساختاری جامد استفاده شدند. برای المان‌های نزدیک فصل مشترک سازه-سیال، روش مرز غوطه‌ور به‌علاوه روش سیال تجسم به کار گرفته‌شده است.

در این مطالعه، CESE به‌عنوان یک حل‌گر سیال تراکم‌پذیر جدید برای حل معادلات جریان غیردائمی واکنش‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته است. این حل‌گر مزایای زیادی از جمله دریافت شوک، اقتباس فضا-زمان یکپارچه و دقت بالا دارد و این فرصت را برای محققان فراهم می‌کند تا هم مسئله کنش سیال-سازه و هم مدل شیمی نرخ محدود واقع‌بینانه را در نظر بگیرند که نقص اصلی مطالعات قبلی در مقالات بود.

این مدل از سه بخش تشکیل شده است: محفظه احتراق، صفحه و قالب. صفحه و قالب به‌وسیله المان‌های پوسته

کافی ریز با اندازه المان ۰/۴۶ میلی‌متر برای ایجاد ایمپالس گسترده در سراسر جبهه موج مورد استفاده قرار گرفته است. چنین تفکیک‌پذیری خوبی، افزایش فشار و انتشار را با دقت زیاد و شیمی مناسب پیش‌بینی خواهد کرد. دینامیک ساختاری محاسباتی شامل قالب صلب، قاب مهار و صفحه تغییر شکل‌پذیر می‌باشد. قالب با المان جامد مدل‌سازی شد. المان‌های صلب و سطح آن به صورت قطعات صلب با قابلیت تماس مدل‌سازی شدند. صفحه توسط یک‌لایه از المان‌های پوسته لاگرانژی با اندازه المان ۰/۵۵ میلی‌متر مش‌بندی شد. از دو آینه‌شدگی برای رسیدن به مدل دوسوم استفاده شد. استفاده از آینه به علت شرایط متقارن مربوط به هر یک از شش وجه تقارنی امکان‌پذیر بود. استفاده از شرایط مرزی انعکاسی در هر یک از سطوح تقارن محفظه یک‌ششم، رسیدن به امواجی مشابه با امواج سیلندر واقعی را ممکن کرد. ناحیه‌ای که بین قاب و قالب قرار دارد توسط فشار کلمپ که در راستای عمود بر سطح ورق اعمال می‌شود، پوشیده و محدود می‌شود. برای این منظور، گره‌های صفحه متناظر با ناحیه درگیر به همراه صفحه فشرده‌شده در جهت عمود بر سطح ورق تحت نیرو قرار گرفته‌اند. روش دیگر، استفاده از گره‌های کاملاً مهارشده برای بخش پوشش یافته صفحه بین قاب و قالب است. هر دو این رویکردها برای مدل‌سازی مکانیسم مهار استفاده می‌شوند. تماس بین صفحه و قالب مخروطی با استفاده از یک تماس سطحی با ضریب میرایی اصطکاک دینامیکی ۰/۴۳ برای دو سطح فولادی توصیه‌شده است. تماس بین صفحه و قاب مهار نیز برای تماس سطحی تعریف می‌شود که نیاز به مش ریز صفحه و قاب مهار دارد.



شکل (۱): مدل یک‌ششم شبیه‌سازی شده سیلندر سه‌بعدی در لحظه بیشترین تغییر شکل ورق

المان حل به چهار دسته‌ی نقاط داخلی سیال، نقاط مجاور سیال، نقاط سیال تجسم یا نقاط سیال پتانسیل تقسیم می‌شود. سپس، معادلات ساختاری جامد با استفاده از حل‌کننده LSDYNA FEM حل می‌شوند. در نتیجه، موقعیت سطح مشترک سیال-سازه به‌روز شده و سرعت سطح مشترک از حل‌کننده ساختاری به دست می‌آید. بعد از این مرحله، کوتاه‌ترین فواصل (تنها برای نقاط نزدیک المان‌های مقطع فصل مشترک) باید به‌روزرسانی شوند تا نقاط داخلی سیال، نقاط مجاور سیال و نقاط تجسمی سیال به دست آیند. در مرحله بعد، نقاط داخلی سیال و معادلات نقاط مجاور سیال به ترتیب با CESE و IBM حل می‌شوند. در نهایت، فشار سیال به حل‌کننده ساختاری بازخورد می‌شود و چرخه از مرحله دوم ادامه می‌یابد تا زمان به پایان برسد.

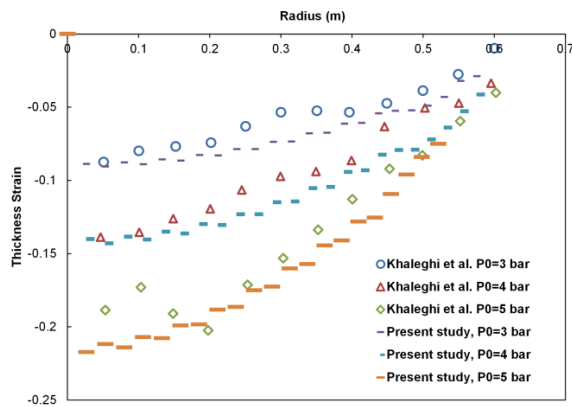
مدل عددی شامل یک‌ششم چیدمان آزمایشگاهی شامل محفظه احتراق، صفحه، قاب مهار و قالب بود. با استفاده از تقارن مدل در شش وجه مختلف، مدل‌سازی صفحه درگیر بر روی یک قاب مثلی قابل اجرا است. انگیزه استفاده از مدل ۱/۶ کاهش زمان CPU و مقایسه با مدل اصلی برای تایید شرایط مرزی به‌کاررفته بود. لازم به ذکر است که ورق می‌تواند بین قاب‌های مهار حرکت کند و در نظر گرفتن ورق به‌عنوان یک محیط ثابت منجر به محدود شدن بیش‌ازحد آن می‌شود. شرایط مرزی چرخش و جابجایی خاص در امتداد خطوط تقارن صفحه مثلی که در شکل ۱ نشان داده شده است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. احتراق با استفاده از یک منطقه داغ یک‌ششم نیم‌کره در سیال با شعاع ۳ میلی‌متر، دمای ۳۰۰۰ کلوین و فشار برابر با فشار پیش‌انفجار انجام شد. شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی لحظه خاتمه تغییر شکل ورق است که اختلاف فشار در جاهای مختلف سیال به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد. این شکل هم‌چنین نشان‌دهنده‌ی شرایط مرزی استفاده‌شده در اضلاع مثلث یک‌ششم است.

یک تصویر دقیق از محدوده محاسباتی در شکل ۲ نشان داده شده است. قطر محدوده استوانه‌ای سیال بر ۱۲۰ میلی‌متر و طول بر ۳۸۰ میلی‌متر تنظیم شده‌اند. در محدوده محاسباتی سیال، شبکه المان جامد ۸ گرهی اوپلرین به‌اندازه

افتاده در پشت پیشانی موج تا زمانی که تعادل انرژی برقرار شود ادامه می‌یابد. شرایط مرزی غیر انعکاسی به هر دو انتهای باز و بسته محفظه احتراق اعمال شد تا اثر انعکاس موج انفجار به حداقل برسد، درحالی‌که شرایط مرزی دیواره جامد به سطح داخلی محفظه احتراق اعمال شد. در مجموع ۹۰۰ هزار المان در مدل عددی مورداستفاده قرار گرفت. هر محاسبه تقریباً به ۲۶۰ ساعت برای تکمیل کار با استفاده از یک پردازنده چهار هسته‌ای ۳/۶ گیگا هرتز نیاز داشت.

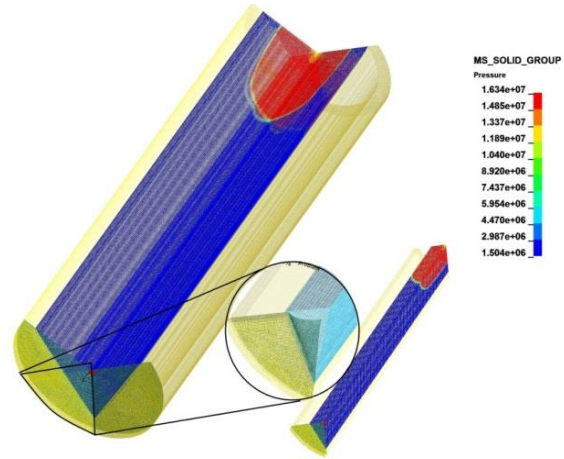
### ۳- نتایج و بحث

مقایسه بین کرنش ضخامتی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی و کرنش ضخامتی پیش‌بینی شده به صورت عددی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): مقایسه بین کرنش ضخامتی نتایج تجربی خالی و شبه‌سازی عددی.

تأثیر افزایش فشار پیش‌انفجار بر کرنش ضخامتی پیش‌بینی شده از شکل مشهود است که در آن کرنش ضخامتی افزایش یافته است. شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل عددی، کرنش ضخامتی را به جز در تعداد کمی از نقاط داده به درستی پیش‌بینی می‌کند. این تفاوت‌های اندک به جبهه شوک مسطح که توسط مدل عددی CESE فرض شده نسبت داده می‌شود متفاوت از بارگذاری شوک واقعی است. با فرض اینکه جبهه شوک مسطح، فشار یکنواختی را در پشت صفحه به دست می‌دهد امکان ارزیابی بهتر مسائل مدل‌سازی مرتبط با شبه‌سازی عددی فراهم می‌شود. در مقابل، جبهه موج شوک تولید شده توسط انفجار سه‌بعدی در

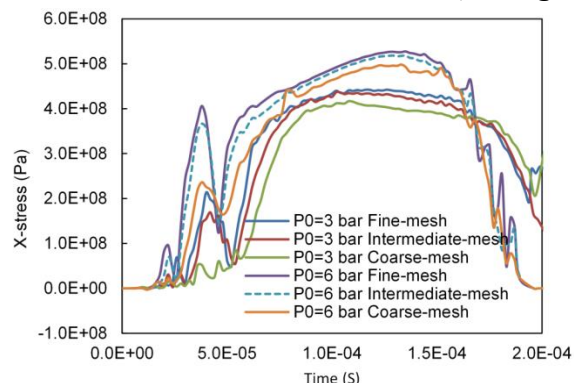


شکل (۴): آینه‌شده‌ی مدل یک‌ششم پس از دو آینه‌شدگی. تماس بین صفحه و قالب مخروطی با استفاده از یک تماس سطحی با ضریب میرایی اصطکاک دینامیکی ۰/۴۳ برای دو سطح فولادی توصیه شده است. تماس بین صفحه و قاب مهار نیز برای تماس سطحی تعریف می‌شود که نیاز به مش ریز صفحه و قاب مهار دارد.

مدل عددی از طریق تجزیه و تحلیل کوپل شده به دست می‌آید که در آن فشار تولید شده توسط انفجار گازی، تغییر شکل ساختاری صفحه را ایجاد می‌کند. کنش سیال-ساختار (FSI) در این پدیده کوپل شده در نظر گرفته شده است. گره‌های موجود در فصل مشترک ماده به دودسته اوپلری و لاگرانژی تفکیک شده‌اند. شبکه اوپلری شرایط مرزی فشار را برای شبکه لاگرانژی فراهم می‌کند و شبکه لاگرانژی به‌عنوان مرز هندسی برای شبکه اوپلری عمل می‌کند. شبکه لاگرانژی با شبکه اوپلری در برخی مکان‌ها همپوشانی می‌کند و یک مرز هندسی را برای سیال‌هایی که به داخل حرکت می‌کنند، ارائه می‌دهد. به‌طور خاص، طول شبکه‌های اوپلری ۰/۳ میلی‌متر تنظیم شده است. لازم به ذکر است که یک شبه‌سازی مش درشت، مکانیسم واقعی موج انفجار را فراهم نخواهد کرد. همچنین برای مش ریز، شبه‌سازی بسیار طولانی و هزینه محاسباتی بسیار زیاد است؛ بنابراین، یک شبکه مش تنظیم شده می‌تواند موج انفجار و جبهه شوک را به‌طور منطقی ثبت کند. ضریب کورانت-فریدلریکز-لوی ۰/۲۵ با قدرت تفکیک شبکه‌ای به میزان ۰/۴۶ میلی‌متر می‌تواند به دست آید. افزایش پیک فشار تولید شده توسط موج انفجار و همچنین فشار گیر



ناهمگنی است که می‌تواند به برهم‌کنش امواج بازتابی و امواج شوک پیش‌رونده مربوط باشد.



شکل (۴): مطالعه‌ی همگرایی مش سیال برای مؤلفه تنش سطحی وارد بر ورق.

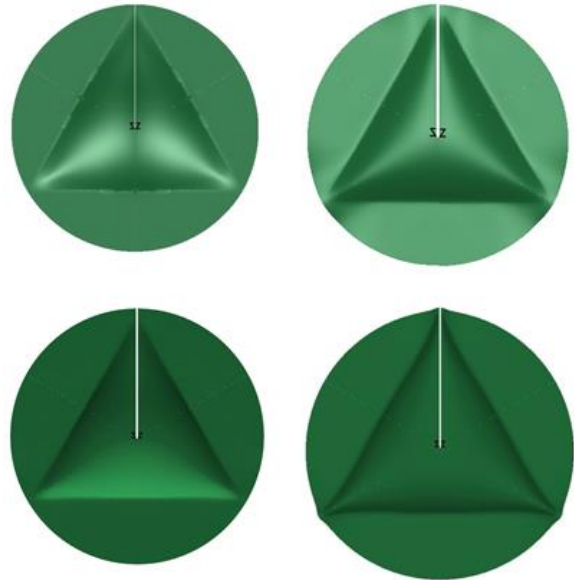
پروفیل شکل‌گیری صفحه یک عامل مهم برای در نظر گرفتن حساسیت صفحه به پارامترهای مختلف مانند فشار پیش‌انفجار، ضخامت صفحه و اندازه آن است. همچنین مد تغییرشکل ویژه صفحه در معرض امواج انفجار را تعیین می‌کند. شکل ۵ پروفایل تغییرشکل صفحات تحت فشار پیش‌انفجار مختلف را نشان می‌دهد. الگوی تغییرشکل پیش‌بینی‌شده صفحات ۱ میلی‌متری نشان می‌دهد که تغییرشکل ورق تحت فشارهای پیش‌انفجار مختلف دارای شباهت‌هایی بوده و با افزایش فشار پیش‌انفجار افزایش می‌یابد. برای موارد مختلف، الگوی صفحه منحرف‌شده یکسان بود، به‌جز اینکه در ناحیه پیرامونی چین‌وچروکی وجود داشت که به بار زیاد فشاری فراتر از عملکرد گیره نسبت داده می‌شود.

شکل ۶ حاوی توزیع میدان دمایی در حالت‌های مختلف تغییرشکل ورق است. واضح است که انحراف خارج از صفحه باگذشت زمان افزایش می‌یابد. در تمام موارد، کانتور دما یک ناحیه بسیار داغ را نشان می‌دهد که یک عامل مهم برای در نظر گرفتن بار دمایی نزدیک صفحه است. هنگامی که پیشانی موج شوک به محل صفحه می‌رسد، به‌عنوان یک موج فشاری بر سطح صفحه اعمال می‌شود. در نتیجه برهم‌کنش بین موج شوک پیش‌رونده با ناحیه داغ در پیشانی، تقابل‌های متعددی رخ می‌دهد که منجر به اتلاف گرما می‌شود. در زمانی که صفحه به حداکثر جابجایی خود برسد دما کاهش می‌یابد. با مقایسه این عکس‌ها، به نظر

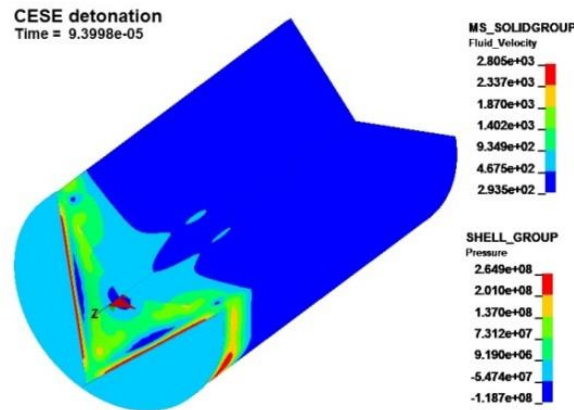
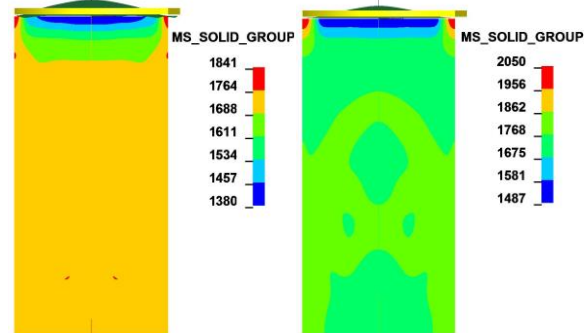
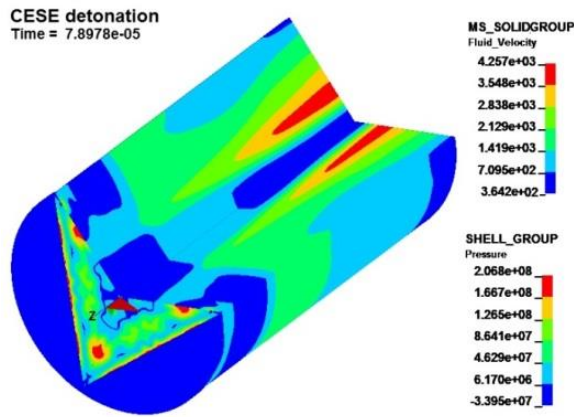
فضا می‌تواند منجر به بارگذاری فشار به‌صورت پیچیده شود. روی‌هم‌رفته، مدل عددی CESE-FEM قادر به اندازه‌گیری دقیق پاسخ دینامیکی کامل سازه ورق نازک تحت بارگذاری انفجار است و تخمین‌های قابل‌اعتمادی از تغییرشکل ورق نازک فولاد نرم تحت بار انفجار مخلوط گازی می‌دهد. تغییرات تنش سطحی ورق نسبت به زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. تفاوت بین منحنی‌ها به دلیل آزاد شدن سریع انرژی شیمیایی مخلوط گازی در نزدیکی محل احتراق است که انرژی شیمیایی گاز منفجره را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و باعث می‌شود که گاز پرفشار در جهت محوری گسترش یابد. در ارتباط با فشارهای مختلف پیش‌انفجار، انحراف بین منحنی‌ها هم در پیک و هم در بخش‌های نوسانی رخ می‌دهد. پیک‌ها و نوسانات منحنی مربوط به انفجار با پیش‌فشار بیشتر، بیشتر از موارد دیگر است که نشان‌دهنده مصرف مقدار بیشتری مخلوط گازی است. با این حال پیش‌بینی اثر پیش‌فشار با توجه به تنش احساس شده در سطح صفحه منطقی نیست، زیرا با توجه به پیچیدگی شبیه‌سازی عددی مربوط به بالاترین نرخ افزایش فشار، سرعت انتشار موج شوک، مدت‌زمان احتراق و فاصله بین نمونه احتراق و زمان پیک فشار، انحرافات قابل‌توجهی می‌تواند رخ دهند. اثر مش‌بندی بر فشار اعمالی بر سطح صفحه اساساً از فشار سیال در مجاورت المان سطح صفحه مشتق می‌شود. مش‌هایی با اندازه‌های ۰/۳۴ (ریز)، ۰/۴۶ (متوسط) و ۰/۵۸ (درشت) استفاده می‌شوند. مشاهده می‌شود که حداکثر اختلاف شکل‌ها باگذشت زمان کاهش می‌یابد و واگرایی بسیار کمی دارند. شواهد جالبی وجود دارد که عملکرد خوب روش را نشان می‌دهند که در آن اختلاف بین منحنی‌های شبیه‌سازی‌شده با مش متوسط و ریز بسیار کم است. به‌عبارت‌دیگر، مش متوسط یک راه‌حل قابل‌اعتماد برای داشتن نتایج منطقی و همگرا است؛ بنابراین، برای داشتن دقت و بازده در همان زمان، اندازه مش متوسط باید استفاده شود. برای فشارهای مختلف پیش‌انفجار، تنش درست بعد از احتراق زیاد می‌شود و به مقدار تنش تسلیم بعد از جبهه شوک می‌رسد که در آن صفحه هنوز الاستیک است. نوسانات در مقادیر تنش نشان‌دهنده سطحی از

میدان سرعت نزدیک صفحه استفاده می‌شود. هر دو تصویر موج شوک پیش‌رونده را با یک رژیم سرعت متغیر یکنواخت نشان می‌دهند که از انتهای بسته به انتهای باز حرکت می‌کند. رژیم سرعت در حال تغییر از طریق مخلوط گازی واکنش نیافته شتاب می‌گیرد. سرعت موج شوک پس از برخورد به صفحه تغییر می‌کند و الگوی میدان سرعت پیچیده‌تری را با تعامل بیشتر امواج شوک ورودی و بازتابی به دست می‌آورد. انتشار امواج شوک پیش‌رونده توسط امواج منعکس‌شده بازداشته خواهد شد. تعامل بیشتر با سطح صفحه نیز یک سری امواج انتشاریافته در جهات عرضی ایجاد می‌کند که به شکل اختلالات کوچک در گوشه‌ها ظاهر می‌شوند. این اثر پس از برخورد با امواج شوک ورودی در جهت طولی بزرگ می‌شود که باعث تغییر گرادیان سرعت می‌شود که دلالت بر تضاد بیشتر الگوی سرعت موج شوک با تغییر شکل جاری صفحه دارد.

می‌رسد که یک ناحیه داغ ثانویه با شدت کمتری با برهمکنش موج پیش‌رونده و بازتابی در فاز آخر شکل‌دهی ورق شکل می‌گیرد.



شکل (۵): جابجایی خارج از صفحه ورق مثلثی.

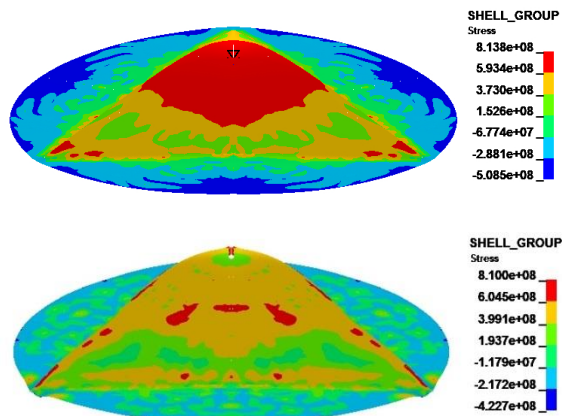


شکل (۶): تکامل میدان دمایی درون محفظه همراه با جابجایی خارج از صفحه ورق مثلثی.

شکل (۷): میدان سرعت توزیع شده محصولات انفجار همراه با فشار سطح صفحه.

شکل ۷ مطالعه دقیق‌تری از الگوهای سرعت موج شوک را نشان می‌دهد. شکل ۷ گرادیان سرعت شامل تغییرات در الگوی موج برخورد به صفحه را نشان می‌دهد. سرعت به‌طور قابل‌توجهی در اول زیاد است و تمایل به عقب انداختن تقابل موج بازتاب‌شده با امواج پیش‌رونده دارد که معادل تغییراتی است که در امواج شوک در تعامل با یک پوسته تغییر شکل پذیر رخ می‌دهد. یک مکان نزدیک به صفحه شامل فشرده‌ترین ناحیه سیال در فاز اولیه پاسخ ورق است. شبکه ظریف‌تر برای گزارش کوچک‌ترین تغییرات در

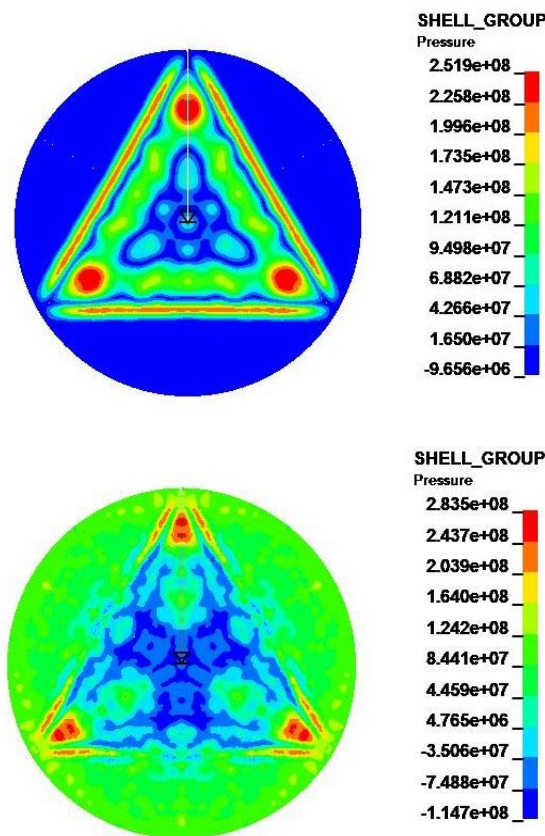
را در طول یک بار ضربه‌ای تغییر دهد. شکل ۹ اثر شرایط مرزی مسدودشده صفحه‌ای بر جابجایی درون صفحه‌ای و تنش سطحی مؤثر المان‌های یک صفحه مثلثی ۱ میلی‌متر تحت فشار ۱۵ بار را که گذشت زمان تغییر می‌کند را نشان می‌دهد.



شکل (۹): تکامل کانتور تنش صفحه مثلثی تغییرشکل داده بازمان.

صفحه پس از آنکه تغییرشکل خمشی در جهت شعاعی اتفاق افتاد به سمت حالت نهایی خود در کم‌تر از ۰/۱۶ میلی‌ثانیه تغییرشکل داد. میزان جابجایی درون صفحه‌ای از حدود چند دهم میلی‌متر به یک میلی‌متر می‌رسد که به‌نوبه خود جابجایی زیادی برای فاصله‌دار کردن ورق از گیره است. تنش ابتدا در لبه‌ها بیشینه بود و پس از اعوجاج ورق، در مرکز نیز افزایش یافت. در نهایت، جایی که بیشترین تنش را داشت، لبه پایینی بود. در تمام مطالعه‌ها و پس از وقوع جرقه، موج انفجاری به سمت ورق حرکت کرد و تقریباً در زمان ۰/۱۵ میلی‌ثانیه از ورق منعکس شد و هم‌زمان با پخش شدن بر سطح ورق، مقدار آن کاهش یافت. در این لحظه تمام ذرات ورق به سمت خارج حرکت کردند و یک سرعت اولیه گرفتند. پس از بارگذاری ورق به‌طور کامل در زمان ۰/۲ میلی‌ثانیه، بیشترین فشار در سطح ورق ثبت شد و مومنتوم منتقل‌شده عاملی برای تغییرشکل پلاستیک ورق معرفی شد. پس‌ازاین زمان و باوجود اعمال مومنتوم کافی از طرف مؤلفه‌ی فشاری موج انفجاری راستای محور سیلندر در زمان کوتاه ۰/۲۵ تا ۰/۵ میلی‌ثانیه، شکل‌دهی ورق پس‌ازاین زمان و باوجود به پایان رسیدن بارگذاری هم ادامه یافت.

شکل ۸ کانتور فشار اثر هندسه مسدودشده بر صفحه تغییرشکل یافته را نشان می‌دهد. فشار در رابطه با موقعیت المان و شرایط مرزی می‌تواند منفی یا مثبت باشد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده‌شده است نزدیک به مرکز صفحه، فشار منفی است که باگذشت زمان تقلیل می‌یابد؛ اما برای المان‌های دور از مرکز و نزدیک مرز، فشار مثبت غالب است. این تفاوت به دلیل انعکاس بیشتر و تقابل امواج فشاری بود. نکته‌ی قابل‌توجه دیگر آنکه باوجود اینکه بیشینه فشار منفی مربوط به کشش ایجادشده در مرکز ورق کاهشی بود ولی بیشینه فشار مثبت مربوط به فشار ایجادشده بر لبه‌ها افزایشی بود که بر نقش قابل‌توجه گیره‌ها در فشردن نمونه تأکید داشت.



شکل (۸): تغییرات کانتور فشار صفحه بازمان.

بیشتر روش‌های مدل‌سازی، حالت صفحات کاملاً مقید در مرزها را در نظر می‌گیرند، با این حال، در بیشتر موارد، صفحات بین گیره‌ها فشرده می‌شوند. گیره از پیش بارگذاری شده می‌تواند رفتار کشش و مقاومت در برابر آسیب صفحه

#### ۴- نتیجه گیری

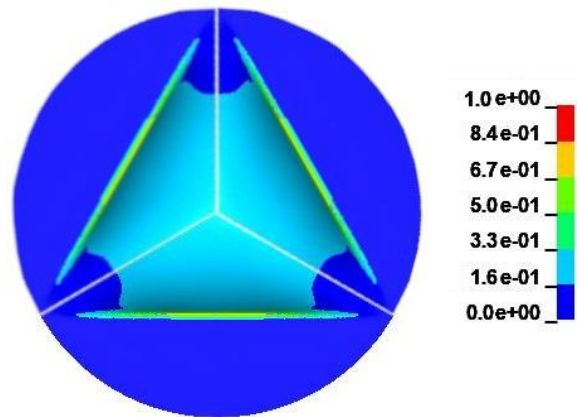
تعامل سیال-جامد از طریق پاسخ دینامیکی صفحه نازک مثلثی تحت انفجار مخلوط گازی هیدروژن و اکسیژن با استفاده از یک رویکرد عددی CESE-FEM مورد مطالعه قرار گرفت. برای سیال از روش اویلری و برای جامد از فرمول بندی لاگرانژی استفاده شد. تمرکز بر اثر تعامل بین امواج انفجار و صفحه برای ارزیابی تغییر شکل و سرعت صفحه بود. مدل عددی توسعه یافته، یک معیار آسیب را بر اساس مدل آسیب جانسون-کوک برای ارزیابی شکست صفحه داشت.

با اعمال این روش، انتشار موج انفجاری و تغییر شکل و پارگی ورق کوپل شدند و نیازی به استفاده از منحنی فشار برای اعمال نیرو بر ورق نبود. همچنین استفاده از معیار تسلیم وابسته به کرنش، نرخ کرنش و دما در پیش بینی خرابی ورق تحت انفجار مخلوط گازی به نتایج دقیق تری انجامید. پیش از هر مطالعه ای، بررسی وابستگی نتایج به اندازه شبکه بندی، بر تغییر جهت پیشانی موج و ایجاد آشفتگی معکوس در آن بر اثر استفاده از شبکه بزرگ تر از نیم میلی متر دلالت داشت. آشفتگی معکوس پیشانی موج از قدرت انفجار و دقت نتایج کاست. پس از اطمینان از توانایی مدل در شبیه سازی تغییر شکل دینامیکی ورق بر اثر انفجار با کنترل دقیق شرایط مرزی در فضای شبیه سازی اویلری و لاگرانژی مطالعه تأثیر انفجار مخلوط گازی استوکیومتری اکسیژن و هیدروژن بر تغییر ورق بر یکنواخت بودن تغییر شکل ورق طی فرایند شکل دهی ورق دلالت داشت.

مدل المان محدود در ارزیابی تغییر شکل بزرگ صفحات مثلثی نازک با شرایط مرزی مسطح نشان داد که صفحات مثلثی مشابهی با لولاهای پلاستیک در امتداد لبه ها و قطر ها شکل گرفتند که فشار حداکثری، تغییر شکل و سرعت المان های صفحه به شدت به فشار پیش انفجار، محل نقطه اشتعال و ظرفیت طولی سیلندر وابسته بودند. با افزایش مقدار فشار پیش انفجار و مکان نقطه اشتعال نزدیک تر به صفحه، آسیب در لبه های صفحه مشاهده شد. در نتیجه، روش عددی ارائه شده را می توان به عنوان یک روش قابل اعتماد در طراحی صفحات شکل گرفته با روش بارگذاری

باگذشت زمان، فشار حداکثری المان های ورق از مرکز ورق به سمت مرزها حرکت کرد. علت این جابجایی، محدود شدن حرکت المان های ورق در جهت های محیطی و شعاعی ورق در این نقاط بود در حالی که سایر المان های ورق آزادانه حرکت می کردند. در زمان ۰/۷ میلی ثانیه، فشار منعکس شده پس از انعکاس های متعدد موج انفجاری از ورق و دیواره ها، کاهش شدیدی پیدا کرد. به طور کلی، ورق علاوه بر تغییر شکل پلاستیک، رفت و برگشت های ارتجاعی الاستیک هم داشت که در نهایت تغییر شکل ورق فقط شامل مؤلفه پلاستیک تغییر شکل بود.

بر اساس میدان تغییر شکل به دست آمده، المان های آسیب دیده صفحه مثلثی تعیین می شوند. شکل ۱۰ نشان دهنده فرآیند آسیب اولیه صفحه تحت فشار پیش انفجار ۱۵ بار است که در آن آسیب در نقطه میانی هر لبه آغاز شده و در امتداد لبه ها به سمت گوشه ها گسترش می یابد. این حالت شکست مشابه با حالت شکست ناشی از تنش کششی است و باید از حالت شکست برشی عرضی که ناشی از تنش های برشی است و منجر به انحراف ورق در جهت عرضی می شود تمیز داده شود [۳۴]. ناحیه آسیب موضعی، بزرگ ترین تغییر شکل پلاستیک را که فراتر از تحمل است نشان می دهد که از حداقل کرنش پلاستیک مورد نیاز برای شکست فراتر نمی رود. کانتور آسیب ایجاد شده نشان می دهد که احتمال وقوع آسیب در ضلع مثلث بیشترین است و احتمال وقوع آسیب در گوشه ها و مرکز مثلث کم است.



شکل (۱۰): کانتور آسیب ایجاد شده در ورق.



effect of glass particles filling a partially confined space on a blast wave. *International Journal of Multiphase Flow*. 2021;136:103546.

[11] Yao S, Zhang D, Lu Z, Lin Y, Lu F. Experimental and numerical investigation on the dynamic response of steel chamber under internal blast. *Engineering Structures*. 2018;168:877-88.

[12] Yan C, Wang Z, Liu K, Zuo Q, Zhen Y, Zhang S. Numerical simulation of size effects of gas explosions in spherical vessels. *Simulation*. 2017;93(8):695-705.

[13] Xu H, Ni X, Su X, Xiao B, Luo Y, Zhang F, et al. Experimental and numerical investigation on effects of pre-ignition positions on knock intensity of hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(52):26631-45.

[14] Yuen SCK, Nurick G. Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2005;31(1):55-83.

[15] Mehreganian N, Louca L, Langdon G, Curry R, Abdul-Karim N. The response of mild steel and armour steel plates to localised air-blast loading-comparison of numerical modelling techniques. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;115:81-93.

[16] Chafi MS, Karami G, Ziejewski M. Numerical analysis of blast-induced wave propagation using FSI and ALE multi-material formulations. *International Journal of Impact Engineering*. 2009;36(10-11):1269-75.

[17] Im K, Cook Jr G, Zhang Z-C. FSI Based on CESE Compressible Flow Solver with Detailed Finite Rate Chemistry.

[18] Kim D-h, Yoh JJ. Predictive model of onset of pipe failure due to a detonation of hydrogen-air and hydrocarbon-air mixtures. *international journal of hydrogen energy*. 2009;34(3):1613-9.

[19] Safari K, Zamani J, Khalili S, Jalili S. Experimental, theoretical, and numerical studies on the response of square plates subjected to blast loading. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2011;46(8):805-16.

[20] Salvadore F, Bernardini M, Botti M. GPU accelerated flow solver for direct numerical simulation of turbulent flows. *Journal of Computational Physics*. 2013;235:129-42.

[21] Samiee A, Amirkhizi AV, Nemat-Nasser S. Numerical study of the effect of polyurea on the performance of steel plates under blast loads. *Mechanics of Materials*. 2013;64:1-10.

انفجاری به کار برد زیرا حالت آسیب، تغییر شکل بزرگ و نازک شدن را به عنوان تابعی از مکان و شدت بار ضربه‌ای پیش‌بینی می‌کند.

## ۵- مراجع

[1] Li J, Ren H, Ning J. Numerical application of additive Runge-Kutta methods on detonation interaction with pipe bends. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(21):9016-27.

[2] Lepikhin P, Romashchenko V, Beiner O. A numerical study of 3D dynamics and strength of metal-composite cylinders under internal explosion loading. *Strength of Materials*. 2017;49(6):796-808.

[3] Malekan M, Khosravi A, Cimini Jr CA. Deformation and fracture of cylindrical tubes under detonation loading: A review of numerical and experimental analyses. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2019;173:114-32.

[4] Mirzaei M, Najafi M, Niasari H. Experimental and numerical analysis of dynamic rupture of steel pipes under internal high-speed moving pressures. *International Journal of Impact Engineering*. 2015;85:27-36.

[5] Veisi B, Narooei K, Zamani J. Numerical investigation of circular plates deformation under air blast wave. *Iranian Journal of Materials Forming*. 2016;3(1):12-26.

[6] Amini M, Amirkhizi A, Nemat-Nasser S. Numerical modeling of response of monolithic and bilayer plates to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2010;37(1):90-102.

[7] Costin NS. Numerical simulation of detonation of an explosive atmosphere of liquefied petroleum gas in a confined space. *Defence Technology*. 2014;10(3):294-7.

[8] Debnath P, Pandey K. Numerical analysis of detonation combustion wave in pulse detonation combustor with modified ejector with gaseous and liquid fuel mixture. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020:1-12.

[9] Wu C, Lukaszewicz M, Schebella K, Antanovskii L. Experimental and numerical investigation of confined explosion in a blast chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013;26(4):737-50.

[10] Sugiyama Y, Homae T, Matsumura T, Wakabayashi K. Numerical study on the mitigation

- [28] Im K, Cook Jr G, Jhang Z, Lee S, editors. FSI detailed chemistry and their applications in LS-DYNA CESE compressible solver. 11th European LS-DYNA® user conference; Salzburg, Austria; 2015.
- [29] Zhang Z-c, Cook Jr G, Im K-s. Overview of the CESE Compressible Fluid and FSI Solvers.
- [30] Evans JS, Schexnayder Jr CJ. Influence of chemical kinetics and unmixedness on burning in supersonic hydrogen flames. AIAA journal. 1980;18(2):188-93.
- [31] Gato C. Detonation-driven fracture in thin shell structures: Numerical studies. Applied Mathematical Modelling. 2010;34(12):3741-53.
- [32] Heidari A, Wen JX. Numerical simulation of flame acceleration and deflagration to detonation transition in hydrogen-air mixture. International Journal of Hydrogen Energy. 2014;39(36):21317-27.
- [33] Khaleghi M, Aghazadeh BS, Bisadi H. Efficient oxyhydrogen mixture determination in gas Detonation forming. Int J Mech Mechatron Eng. 2013;7:1748-54.
- [34] Niasari H, Liaghat G. Numerical investigation of dynamic crack growth in steel pipes under internal detonation loading. Modares Mechanical Engineering. 2017;17(9):214-24.
- [22] Yaşar M, Demirci HI, Kadi I. Detonation forming of aluminium cylindrical cups experimental and theoretical modelling. Materials & design. 2006;27(5):397-404.
- [23] Xue Y, Chen G, Zhang Q, Xie M, Ma J. Simulation of the dynamic response of an urban utility tunnel under a natural gas explosion. Tunnelling and Underground Space Technology. 2021;108:103713.
- [24] Rokhy H, Soury H. Fluid structure interaction with a finite rate chemistry model for simulation of gaseous detonation metal-forming. International Journal of Hydrogen Energy. 2019;44(41):23289-302.
- [25] Gwak M-c, Lee Y, Kim K-h, Yoh JJ. Deformable wall effects on the detonation of combustible gas mixture in a thin-walled tube. International Journal of Hydrogen Energy. 2015;40(7):3006-14.
- [26] Aune V, Valsamos G, Casadei F, Langseth M, Børvik T. Fluid-structure interaction effects during the dynamic response of clamped thin steel plates exposed to blast loading. International Journal of Mechanical Sciences. 2021;195:106263.
- [27] Rokhy H, Mostofi TM. 3D numerical simulation of the gas detonation forming of aluminum tubes considering fluid-structure interaction and chemical kinetic model. Thin-Walled Structures. 2021;161:107469.



## Numerical Simulation of Triangular Plate Deformation Profile under Gaseous Detonation Loading

Mojtaba Haghgoo<sup>1</sup>, Hashem Babaei<sup>2\*</sup>, Tohid Mirzababaie Mostofi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

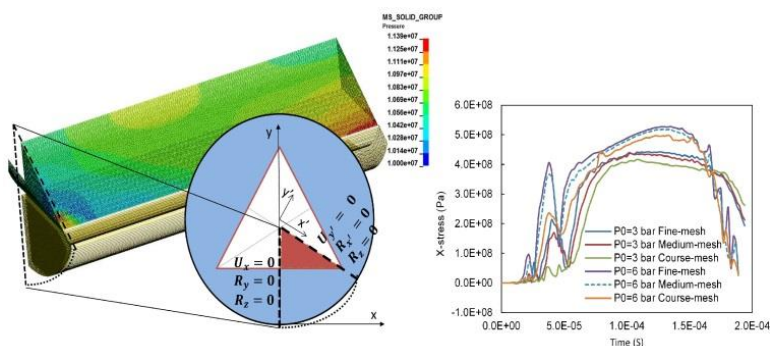
<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran

### HIGHLIGHTS

- Using Euleran method for fluid and Lagrangion formulation for solid
- Coupled interaction between detonation waves and plate surface
- Enhanced deformation with higher pre-detonation pressuer anda closed ignition location

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 8 April 2022

Received in revised form: 22 April 2022

Accepted: 14 May 2022

Available online: 28 June 2022

\*Correspondence:

ghbabaei@guilan.ac.ir

#### How to cite this article:

M. Haghgoo, H. Babaei, T.M. Mostofi. Numerical Simulation of Triangular Plate Deformation Profile Under Gaseous Detonation Loading. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(1):1-15.

#### Keywords:

Triangualr plate

Gaseous detonation

Numerical simulation

Immersed boundary method

### ABSTRACT

An elaborate numerical study with a validated LS-DYNA® immersed boundary method fluid-solid interaction code is used to characterize the influence of pre-detonation pressure and time duration on plastic deformation of thin steel triangular plates subjected to gaseous detonation. Other objectives of this numerical simulation such as estimation of deflection and stress contour of material at high strain rate are derived based on a strain-rate dependent Johnson-Cook material model. Simulation relies on the modeling of detonation by chemical reaction kinetic and its propagation by Conservative Element Solution Element (CESE) solver. Immersed boundary method is used to simulate the interface motion between the detonating gas and the deforming plate to facilitate the assessment of fluid pressure distribution on the plate surface. The numerical tool relates the pressure distribution and gaseous detonation parameters to the plate macroscopic deformation by employing multi-species reactive Euler's equations for the gas and Lagrangian equation for plate. Numerical method as an appropriate tool in the evaluation of the deflection profile of the triangular plate shows that deflection decreases by the smaller size of the exposed area of the plate.

\* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.





