



## بررسی عددی شکل گیری انعکاس ماخ در شکل دهی انفجاری آزاد پوسته های استوانه ای

بسته

محمود هاب موسوی<sup>1</sup>، جمال زمانی<sup>2\*</sup>، سید محمدرضا خلیلی<sup>3</sup>

- 1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 \* صندوق پستی 19395-1999، zamani@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این پژوهش ایجاد انعکاس ماخ و تأثیر آن در شکل دهی انفجاری آزاد پوسته های استوانه ای بسته با استفاده از شبیه سازی عددی بررسی شده است. این پوسته ها از آلومینیوم 6063-T5 اکستروژده ساخته شده و نسبت قطر به طول آن ها 1/5 است. دو انتهای پوسته ها نیز با اتصال ورق های صلب بسته شده است. شبیه سازی عددی شکل گیری انعکاس ماخ و پاسخ پلاستیک پوسته ها استفاده از هیدروکد اتوداین و با گسسته سازی لاگرانژی-اولیری کوپل شده انجام شد. شکل گیری انعکاس ماخ بر روی ورق های انتهایی مشاهده و مشخص شد که فشار ایجاد شده در ناحیه ای که ماخ استم به آن برخورد کرده است، بسیار بیشتر از دیگر نواحی است. این موضوع موجب ایجاد پارگی موضعی در محل اتصال پوسته به ورق ها، پیش از انجام فرایند شکل دهی می گردد. مقایسه بیشینه تغییر شکل دست آمده از این تحقیق با نتایج آزمایش های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی نشان داد که همگرایی میان نتایج تجربی و عددی بیش از 93% است. همچنین با توجه به پیچیدگی های مربوط به انعکاس و تداخل امواج انفجار، شبیه سازی به روش لاگرانژی-اولیری کوپل شده روش مناسبی برای بررسی مسائل انفجار داخلی است. علاوه بر آن حالات واماندگی نیز با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی و توافق خوبی با آزمایش ها مشاهده شد.

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 28 آذر 1392  
 پذیرش: 12 بهمن 1392  
 ارائه در سایت: 16 مهر 1393  
 کلید واژگان:  
 شکل دهی انفجاری  
 انعکاس ماخ  
 پوسته استوانه ای  
 روش لاگرانژی-اولیری کوپل شده

## Numerical investigation of formation of Mach reflection in explosive free forming of confined cylindrical shells

Mohammad Vahhab Mousavi, Jamal Zamani\*, Seyed Mohammad Reza Khalili

Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran  
 \* P.O.B.19395-1999 Tehran, Iran, zamani@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 19 December 2013  
 Accepted 01 February 2014  
 Available Online 08 October 2014

**Keywords:**  
 Explosive Forming  
 Mach Reflection  
 Cylindrical Shell  
 Coupled Lagrangian-Eulrian Method

### ABSTRACT

In this research, a Mach reflection and its effect on explosive free forming of confined cylindrical shells are studied numerically. These shells were manufactured from extruded 6063-T5 Aluminum alloy. The diameter of shell was 1.5 times larger than its length. Its ends were sealed with rigid sheets. The simulation of formation of Mach reflection and plastic response of shell were done with Autodyne hydrocode and coupled Lagrangian-Eulrian spatial discretization. Formation of Mach reflection occurred on end plates. It is observed that the generated pressure in an area that is affected by Mach stem is higher than elsewhere. This phenomena causes rupture in boundaries area of shell to plate connections, before forming process. The maximum of transverse deformation that obtained from this study compared with experimental results which done in explosion mechanic laboratory in K. N. Toosi university of technology. The experimental and numerical results shows more than 93% agreement. Meanwhile, because of blast waves reflection and interaction of waves, coupled Lagrangian-Eulrian method is suitable method for investigation of internal explosion problems. In addition failure modes was simulated with finite element software Abaqus and good agreement was found between the results.

### 1- مقدمه

بهبود نسبی خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعه اشاره کرد [1]. در این فرایند از محیط های واسط مختلف مانند هوا، آب و دیگر محیط های انتقال انرژی برای انتقال پالس فشاری حاصل از انفجار استفاده می شود. بهطور کلی شکل دهی انفجاری با استفاده از قالب و یا به صورت آزاد (بدون قالب) انجام می شود. در شکل دهی انفجاری با استفاده از قالب، کنترل شکل و اندازه قطعه

امروزه شکل دهی انفجاری یکی از روش های مهم شکل دهی فلزات به شمار می آید. استفاده از این روش در صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی و صنایع شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای آن می توان به امکان ساخت قطعات بزرگ، کاهش هزینه های ابزارسازی، حفظ تolerانس های دقیق و نیز

نسبت قطر به طول پوسته‌ها برابر  $1/5$  بوده و دو انتهای آن‌ها با ورق‌های صلب مسدود شده است. در این مقاله مکانیزم بارگذاری انفجاری در سازه‌های بسته و شرایط ایجاد انعکاس ماخ، نحوه انجام آزمایش‌ها، ضرورت استفاده از شبیه‌سازی عددی در بررسی انفجار داخلی و مراحل شبیه‌سازی تشریح شده است. در بخش نتایج، شکل‌گیری انعکاس ماخ، توزیع فشار و ایمپالس بر روی سطح داخلی پوسته مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و پیشینه تغییر شکل و به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایش‌ها مقایسه شده است. با توجه به مزیت‌های نسبی نرم‌افزار آباکوس<sup>4</sup> در شبیه‌سازی شکست و آسیب، حالت واماندگی پوسته‌ها توسط این نرم‌افزار مدل‌سازی و توافق خوبی با آزمایش‌ها مشاهده شد. نتایج به دست آمده ارائه اطلاعات مناسبی از نحوه انتشار و انعکاس امواج شوک حاصل از انفجار داخلی موجب می‌شود که فیزیک این فرایند بهتر درک شود.

## 2- بارگذاری انفجاری در سازه‌های بسته

پس از وقوع انفجار در یک سازه بسته، موج شوک حاصل از انفجار در محیط واسط گسترش یافته و دو فاز بارگذاری بر سازه اعمال می‌شود. در ابتدا یک پالس فشاری به دیواره سازه برخورد می‌کند و منعکس می‌شود و پس از آن به دلیل هندسه بسته، چندین انعکاس پیاپی اتفاق خواهد افتاد. به دلیل بازگشت ناپذیری ترمودینامیکی، پالس‌های فشاری میرا شده و محصولات گازی حاصل از انفجار موجب ایجاد فشاری شبه استاتیک در سازه می‌شود [10].

فرایند انعکاس موج شوک، وابسته به هندسه سازه و قدرت موج شوک است. به طور کلی انعکاس موج شوک به انعکاس منظم<sup>5</sup> و انعکاس ماخ<sup>6</sup> تقسیم بندی می‌شود [11]. انعکاس منظم متشکل از موج فرودی<sup>7</sup> و موج منعکس شده<sup>8</sup> است که در نقطه انعکاس متقاطع می‌شوند. هنگامی که موج منعکس شده به موج فرودی برسد، یک موج متحد تشکیل می‌شود. این موج متحد ماخ استم<sup>9</sup> نام دارد. امواج فرودی، منعکس شده و ماخ استم در نقطه‌ای به نام نقطه سه‌گانه<sup>10</sup> با یکدیگر متقاطع می‌شوند [12]. در شکل 1 نمایی از انعکاس منظم و انعکاس ماخ نشان داده شده است. ماخ استمی که توسط امواج شوک گروهی مانند موج حاصل از انفجار یک خرج کروی تولید می‌شود، به تقریب دارای هندسه نیم کروی است [13]. با پیشروی موج شوک، ماخ استم بزرگ‌تر می‌شود. اگر در این حالت در مسیر پیشروی موج سنسورهایی قرار گیرد، سنسوری که پایین‌تر از نقطه سه‌گانه قرار دارد، یک فشار را که مربوط به ماخ استم است ثبت می‌کند و سنسوری که بالاتر از نقطه سه‌گانه باشد دو فشار ناشی از موج فرودی و موج منعکس شده را ثبت خواهد نمود. قدرت ماخ استم تشکیل شده بیشتر از موج فرودی است به همین دلیل در مطالعه مسائل انفجار داخلی، تبدیل انعکاس منظم به انعکاس ماخ برای بررسی پروفیل فشار اعمالی بر سازه مهم است.

به طور کلی انعکاس منظم در زاویه خاصی که زاویه انتقال<sup>11</sup> نامیده می‌شود به انعکاس ماخ تبدیل می‌شود.

این زاویه به عدد ماخ موج شوک بستگی دارد. معیارهای بسیاری برای پیش‌بینی تبدیل انعکاس منظم به انعکاس ماخ معرفی شده‌اند اما تاکنون هیچ معیار قطعی در این زمینه استخراج نشده است [15]. اکثر پژوهش‌های انجام

به طور عمده به قالب بستگی دارد [2]؛ اما در شکل‌دهی انفجاری آزاد، مکانیزم بارگذاری انفجاری و کنترل توزیع پروفیل فشار بر سطوح داخلی پوسته تعیین کننده است. یکی از نکات مؤثر در موفقیت فرایند شکل‌دهی انفجاری آزاد، بررسی دقیق نحوه انتشار موج شوک حاصل از انفجار و توزیع پروفیل فشار بر روی پوسته است. فرایندهای شکل‌دهی انفجاری آزاد برای تولید مخازن کروی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است [3,2]. در این فرایندها ابتدا پوسته به صورت پیش فرم آماده می‌شود و سپس با ایجاد انفجار در داخل آن فرایند شکل‌دهی انجام می‌شود.

بررسی پدیده انفجار در داخل یک پوسته استوانه‌ای بسته به دلیل انعکاس و تداخل امواج حاصل از انفجار پیچیده‌تر از پوسته‌های کروی است. تاکنون پژوهش‌های اندکی در این زمینه انجام شده است. هدف اکثر پژوهش‌ها یافتن رابطه‌ای بین وزن ماده منفجره و میزان تغییر شکل پوسته، حالات واماندگی<sup>1</sup> و نحوه آغاز شکست و گسیختگی پوسته است.

دافی و میشل [4] کرنش محیطی نهایی را برای پوسته‌های استوانه‌ای بلند تحت انفجار داخلی محاسبه نمودند. پالس فشاری حاصل از انفجار به صورت پالس فشاری مثلثی ساده‌سازی شد.

فانوس و گریمین [5] پاسخ پوسته‌های متقارن محوری را تحت بارگذاری انفجاری داخلی بررسی نمودند. آن‌ها فرض کردند که در این حالت ایمپالس به صورت موضعی بر یک سطح دایره‌ای وارد شده و موجب ایجاد تغییر شکل نهایی به شکل بیضی می‌گردد.

بنهم و دافی [6] پیشینه تغییر شکل مخازن استوانه‌ای تحت انفجار داخلی را محاسبه نمودند. این مخازن دارای طول بزرگ‌تر از قطر بوده و توسط درپوش‌های صلب بسته شده بودند. آن‌ها پالس فشاری را به صورت تابعی نمایی فرض کرده و معادلات حاکم را با استفاده از این تابع حل نمودند.

لیلپ و تورن [7] دریافتند تغییر شکل پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری پالسی با لغزش برشی در تکیه‌گاه‌ها آغاز می‌گردد. همچنین با افزایش طول استوانه، اثر لغزش برشی در تغییر شکل کاهش می‌یابد.

زمانی و همکاران [8] پیشینه تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای را تحت بارگذاری انفجاری داخلی با استفاده از روش انرژی محاسبه نمودند.

کریمی و میرزایی [9] با استفاده از روش‌های محدود، تنش‌های مکانیکی و حرارتی در استوانه جدار نازک تحت بارگذاری انفجاری گازی داخلی را محاسبه نمودند. آن‌ها تغییر مکان‌های مکانیکی و حرارتی ناشی از انفجار را به طور جداگانه محاسبه نموده و با استفاده از آن‌ها، تنش‌های مکانیکی و حرارتی را استخراج کردند.

در اکثر مطالعات تحلیلی، فرضیات ساده کننده‌ای در خصوص توزیع پروفیل فشار و پدیده انعکاس در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن مطالعه پاسخ پوسته استوانه‌ای بسته در برابر انفجار داخلی هنگامی پیچیده‌تر می‌شود که قطر پوسته از طول آن بزرگ‌تر باشد. در این حالت امکان ایجاد انعکاس ماخ در دو انتهای مسدود شده پوسته وجود دارد. این موضوع ارائه یک رابطه تحلیلی برای پروفیل فشار را پیچیده می‌کند. بنابه بررسی نگارندگان، تاکنون پدیده انعکاس ماخ در شکل‌دهی انفجاری مورد توجه قرار نگرفته است.

هدف از این پژوهش بررسی پدیده انعکاس ماخ و تأثیر آن بر پاسخ

پلاستیک پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی با استفاده از روش لاگرانژی - اویلری کوپل شده<sup>2</sup> است. برای این منظور از هیدروکد اتوداین<sup>3</sup> استفاده شد.

1- Failure mode  
2- Coupled Lagrangian-Eulerian method  
3- Autodyn

4- Abaqus  
5- Regular reflection  
6- Mach reflection  
7- Incident wave  
8- Reflected wave  
9- Mach stem  
10- Triple point  
11- Transition angle

کینی و گراهام [16] زاویه تبدیل انعکاس منظم به انعکاس ماخ را برای انفجار بالای سطح زمین با استفاده از رابطه تجربی (1) محاسبه نمودند. در این رابطه  $\alpha_m$  زاویه انتقال بر حسب درجه و  $M$  عدد ماخ موج فرودی است.

$$\alpha_m = \frac{1.75}{(M-1)} + 39 \quad M > 1 \quad (1)$$

هنگامی که زاویه برخورد از  $\alpha_m$  بزرگ تر شود، تشکیل ماخ استم امکان پذیر می شود. شکل 3 نمودار زاویه انتقال بر حسب عدد ماخ را نشان می دهد که با استفاده از رابطه (1) ترسیم شده است. درامواج شوک با عدد ماخ بزرگ تر از 3، با افزایش عدد ماخ، زاویه انتقال تغییرات چندانی نداشته و در حدود  $40^\circ$  است.

برای استفاده از رابطه (1) محاسبه عدد ماخ موج فرودی ضروری است. یک تقریب برای محاسبه عدد ماخ موج فرودی، رابطه ای است که توسط کینی و گراهام [16] برای انتشار آزاد موج انفجار در اتمسفر استخراج شده است. این معادله توسط رابطه (2) بیان می شود.  $P/P_a$  نسبت بیش فشار<sup>1</sup> موج انفجار به فشار اتمسفر و  $K$  نسبت ظرفیت حرارتی هوا است که در این پژوهش برابر  $1/34$  در نظر گرفته شده است. رابطه (3) بیش فشار را به صورت تابعی از فاصله مقیاس شده  $Z^2$  نشان می دهد. فاصله مقیاس شده توسط رابطه (4) بیان می شود که در آن  $W$  وزن معادل TNT برای ماده منفجره استفاده شده و  $R$  فاصله از مرکز ماده منفجره است.

$$M = \sqrt{1 + \frac{K+1}{2K} \left(\frac{P}{P_a}\right)} = \sqrt{1 + \left(\frac{6P}{7P_a}\right)} \quad (2)$$

$$\frac{P}{P_a} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}} \quad (3)$$

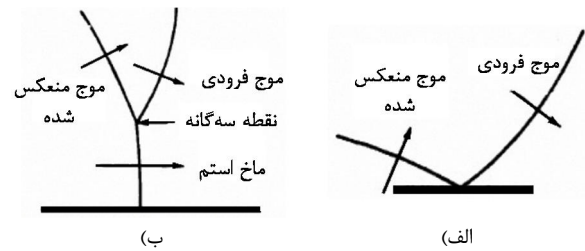
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (4)$$

### 3- آزمایش ها

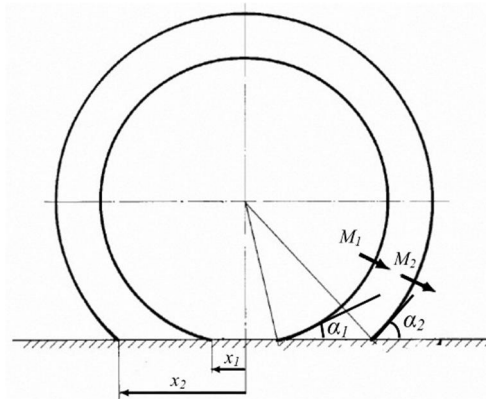
در این پژوهش به منظور صحت گذاری شبیه سازی عددی، از نتایج آزمایش های انجام شده در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی [8] استفاده شده است. توضیحات مختصری در خصوص نحوه انجام آزمایش ها در ادامه ملاحظه می گردد.

تمامی نمونه های استفاده شده در این آزمایش ها از آلومینیوم 6063-T5 اکسترود شده ساخته شد. ترکیب عناصر موجود در این آلیاژ که توسط آزمایش کوانتومتری به دست آمده، در جدول 1 نشان داده شده است.

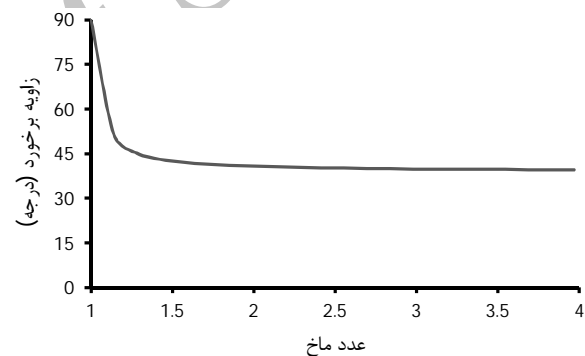
از دو پوسته استوانه ای با ابعاد مختلف و نسبت قطر به ارتفاع  $1/5$  استفاده شد. برای ایجاد فضای بسته، دو عدد ورق آلومینیومی به ضخامت 4 میلیمتر با استفاده از روش TIG به دو انتهای پوسته ها جوش داده شد. تعدادی از نمونه ها با یک پاس و تعدادی دیگر با دو پاس جوش به ورق ها متصل شدند. همچنین در مرکز یکی از ورق ها سوراخی جهت عبور ماده منفجره و چاشنی ایجاد گردید. از هر کدام نمونه های اشاره شده 12 عدد ساخته شد و هر آزمایش نیز سه مرتبه تکرار گردید. برای به دست آوردن خواص مکانیکی بر روی نمونه ها تست کشش انجام شد. ابعاد و خواص مکانیکی نمونه ها در جدول 2 نشان داده شده است.



شکل 1 نمایی از انعکاس موج شوک (الف) انعکاس منظم (ب) انعکاس ماخ [14]



شکل 2 برخورد موج شوک کروی با سطح تخت در دو زمان متفاوت [15]



شکل 3 نمودار زاویه انتقال بر حسب عدد ماخ

جدول 1 ترکیب عناصر موجود در آلیاژ بر حسب درصد وزنی

Al	Pb	Cr	Sb	Ni	Mn	Ti	Cu	Zn	Fe	Mg	Si
0/0020	0/020	0/030	0/060	0/080	0/170	0/620	0/720	1/760	6/880	0/25	

جدول 2 ابعاد و خواص مکانیکی نمونه ها

نمونه	قطر خارجی طول ضخامت چگالی مدول یانگ تنش تسلیم نسبت کرنش	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m <sup>3</sup> )	(GPa)	(MPa)	پواسون نهایی
شماره 1	100	150	1	3	2700	69	175	0/3
شماره 2	80	120	2	3	2700	69	175	0/2

شده در این زمینه، بر روی موج شوک صفحه ای در جریان های یکنواخت متمرکز شده است. در این جریان ها، عدد ماخ و زاویه برخورد موج شوک ثابت می ماند. استخراج معیار تبدیل انعکاس منظم به انعکاس ماخ برای امواج شوک کروی حاصل از انفجار با امواج شوک صفحه ای متفاوت است. هنگامی که این امواج انفجار منتشر می شوند، عدد ماخ آن ها کاهش یافته و زاویه برخورد موج با سطح افزایش می یابد. شکل 2 انتشار یک موج شوک کروی و برخورد آن با سطح تخت در دو زمان متفاوت را نشان می دهد. در ابتدا موج انفجار به صورت منظم منعکس می شود و سپس بسته به قدرت آن، انعکاس منظم به انعکاس ماخ تبدیل می شود.

1- Over pressure  
2- Scaled distance

سنسورها علاوه بر قیمت بسیار بالا، در سازه‌های کوچک مشکل است. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای مطالعه و تحلیل این نوع مسائل در اولویت قرار دارد. با استفاده از روش اختلاف محدود لاگرانژی-اویلری کوپل شده که در بخش 4-2 تشریح خواهد شد، نحوه انتشار و انعکاس موج انفجار در قسمت‌های مختلف پوسته بسته قابل‌ردیاباست. همچنین می‌توان نمودار توزیع فشار دینامیک بر حسب زمان را در قسمت‌های مختلف سازه استخراج نمود.

#### 4-2- شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-سازه‌ای

برنامه‌های محاسباتی برای شبیه‌سازی انفجار و پاسخ سازه را می‌توان به دو دسته کوپل و غیرکوپل تقسیم نمود. در تحلیل‌های غیرکوپل محاسبات هیدرودینامیک مربوط به انفجار با فرض صلب بودن سازه انجام می‌شود. در این نوع تحلیل ابتدا کل بار هیدرودینامیک بر روی سازه صلب قرار داده شده و پس از محاسبه فشار، میدان فشار محاسبه شده بر روی سازه تغییر شکل‌پذیر اعمال می‌گردد. در تحلیل‌های کوپل، بار هیدرودینامیکی به شکل تدریجی وارد شده و در هر گام زمانی، محاسبات هیدرودینامیک، همزمان با محاسبات مربوط به پاسخ سازه تغییر شکل‌پذیر انجام می‌شوند. لذا تغییرات فشاری که در اثر حرکت و تخریب سازه به وجود می‌آید را می‌توان با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود. در این پژوهش شبیه‌سازی با استفاده از تحلیل کوپل، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-سازه‌ای<sup>2</sup> نامیده می‌شود.

شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-سازه‌ای به وسیله هیدروکد اتوداین انجام شد. این هیدروکد از روش اختلاف محدود<sup>3</sup> استفاده نموده، به صورت صریح<sup>4</sup> از زمان انتگرال‌گیری می‌نماید و برای بررسی مسائل دینامیکی غیرخطی مانند ضربه، نفوذ و انفجار مناسب است. استفاده از روش‌های گسسته‌سازی فضایی لاگرانژی<sup>5</sup> و اویلری<sup>6</sup> توانایی مدل‌سازی مسائل پیچیده هیدرودینامیکی شامل برهمکنش سیال و جامد را به این نرم‌افزار داده است.

در گسسته‌سازی اویلری مش‌ها در فضا ثابت بوده و مواد امکان حرکت در میان آن‌ها را دارند. این حلگر برای مدل‌سازی سیالات و جامداتی که تحت تغییر شکل‌های بزرگ قرار گرفته‌اند مناسب است. در گسسته‌سازی لاگرانژی مواد بر روی مش‌ها ثابت شده‌اند و می‌توانند در طول بارگذاری تغییر شکل دهند. این روش برای مدل‌سازی جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد. با کوپل نمودن این دو روش که به روش لاگرانژی-اویلری کوپل شده (CLE) معروف است، می‌تواند به روشی کارا برای مطالعه پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری دست یافت. در این روش جامدات توسط شبکه‌بندی لاگرانژی و سیالات توسط شبکه‌بندی اویلری مدل‌سازی می‌شوند. سپس یک قید برهمکنش بین این دو شبکه‌بندی تعریف می‌شود. با تعریف این قید، مدل‌سازی برهمکنش سیال با جامد ممکن می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به امکان بررسی محسوس‌تر رفتار مواد منفجره و محیط واسط در حین فرایند انفجار اشاره نمود.

برای کاهش زمان محاسبات، شبیه‌سازی به صورت متقارن محوری<sup>7</sup> انجام شد. در این مدل هوا و ماده منفجره C4 به صورت اویلری و پوسته استوانه‌ای به صورت لاگرانژی مدل گردید. اندازه بهینه شبکه‌های لاگرانژی و اویلری  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  انتخاب شد. شبکه‌بندی مذکور در شکل 5 نشان داده شده است.

در این آزمایش‌ها برای هر یک از نمونه‌های شماره 1 و 2، از مقادیر مختلف ماده منفجره C4 با شکل کروی استفاده شد. مقدار ماده منفجره به نحوی انتخاب گردید که برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در پوسته کافی بوده و به طور پله‌ای تا ایجاد پارگی<sup>1</sup> در آن افزایش یافت. جرم ماده منفجره مورد استفاده برای هر نمونه در جدول 3 آمده است.

سامانه آزمایش در شکل 4 نشان داده شده است. برای ثابت نگه‌داشتن نمونه‌ها و ایجاد فضای بسته فیکسچری طراحی گردید. فیکسچر متشکل از یک ساختار، 2 صفحه فولادی با ضخامت 15 میلی‌متر و چهار میله رزوه شده است. صفحه فولادی پایینی به ساختار جوش داده شد. به منظور قرارگیری نمونه‌های با ابعاد مختلف، صفحه فولادی بالایی امکان حرکت عمودی داشت. نمونه‌ها توسط 12 عدد پیچ M6 به صفحات فولادی متصل شدند.

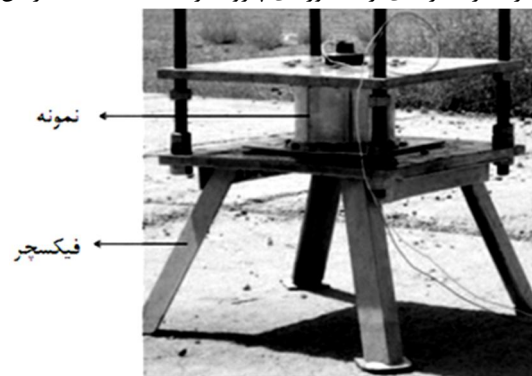
از چاشنی الکتریکی شماره 8 استوانه‌ای شکل برای شروع انفجار استفاده شد. قدرت انفجاری آن معادل 0/7 گرم ماده منفجره C4 است. برای قرار دادن ماده منفجره و چاشنی در پوسته، یک درپوش پیچی طراحی شد. این قطعه موجب قرار گرفتن ماده منفجره و چاشنی در مرکز پوسته و بر روی محور تقارن آن شده و از خروج محصولات گازی حاصل از انفجار جلوگیری نمود.

#### 4- شبیه‌سازی عددی

##### 4-1- ضرورت استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی مسائل انفجار داخلی

استفاده از روش‌های تحلیلی برای بررسی مسائل انفجار داخلی به دلیل پیچیدگی فرایند انعکاس و تداخل امواج انفجار و نیز عدم امکان استخراج رابطه‌ای دقیق برای پروفیل فشار در اکثر مواقع بسیار پیچیده است. در حالی که در مسائل انفجار خارجی توزیع پروفیل فشار بر روی سطوح ساده‌تر بوده و بحث انعکاس و تداخل امواج مطرح نیست. به همین دلیل استفاده از روابط تجربی-تقریبی برای محاسبه پروفیل فشار امکان‌پذیر است.

انجام آزمایش‌های تجربی نیز به دلیل نیاز به تجهیزات پیشرفته و گران‌قیمت برای ثبت مشخصات دینامیکی موج انفجار مانند سرعت و فشار دینامیک و نیز خطرات استفاده از ماده منفجره با محدودیت‌هایی مواجهه است. به عنوان مثال، برای به دست آوردن توزیع پروفیل فشار در قسمت‌های مختلف سازه نیاز به آرایه‌ای از سنسورهای پیزوالکتریک است. استفاده از این



شکل 4 سامانه آزمایش [8]

جدول 3 جرم ماده منفجره مورد استفاده برای هر نمونه

نمونه	جرم C4 (g)
شماره 1	5, 6, 7 و 8
شماره 2	3, 4, 5 و 6

2- Hydrodynamic-Structural  
3- Finite difference  
4- Explicit  
5- Lagrangian  
6- Eulerian  
7- Axisymmetric

1- Rupture

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \omega \frac{e}{V} \quad (5)$$

در این رابطه  $P$  فشار،  $V$  حجم و  $e$  چگالی انرژی داخلی بر واحد حجم اولیه ماده منفجره را نشان می دهد. همچنین پارامترهای  $A, B, \omega, R_1, R_2$ ، در اینجا از مدل جانسون-کوک<sup>2</sup> این معادله حالت بوده و از مشخصات ماده منفجره است. ضرایب معادلات حالت برای هوا و C4 از کتابخانه مواد نرم افزار استخراج گردید. جدول های 4 و 5 به ترتیب ضرایب معادلات حالت JWL و گاز کامل استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهند.

#### 4-2-2- مدل ماده

انتخاب مدل ماده مناسب برای شبیه سازی رفتار پلاستیک سازه تحت بارهای دینامیکی با نرخ بالا بسیار مهم است. در اینجا از مدل جانسون-کوک<sup>2</sup> استفاده شده است. مدل جانسون-کوک تنش جریان را به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما مطابق رابطه (6) بیان می کند:

$$\sigma = \left[ A + B \varepsilon_p^n \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] (1 - T^*)^m \quad (6)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}$$

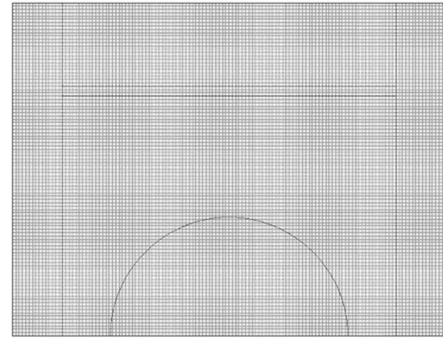
در این رابطه  $\sigma$  تنش جریان،  $\varepsilon_p$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\varepsilon}_p$  نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه،  $T$  دما،  $T_{melt}$  دمای ذوب ماده و  $T_{room}$  دمای محیط است. ضرایب  $A, B, C, m, n$  و ثابت ماده می باشند. برای آلومینیوم T5-6063 ضرایب  $A, B$  و  $n$  با استفاده از نتایج تست کشش انجام شده محاسبه شد. ضریب  $C$  ثابت مربوط به اثر نرخ کرنش است که از انجام آزمایش های استاندارد در نرخ کرنش های بالا به دست می آید. ضرایب  $C$  و  $m$  از مرجع [18] انتخاب شد. جدول 6 ثوابت مدل جانسون-کوک استفاده شده در شبیه سازی را نشان می دهد. با توجه به اینکه کرنش های الاستیک ایجاد شده در ورق های انتهایی و صفحات فولادی فیکسچر در طی آزمایش ها بسیار کوچک است، فرض شد که این اجزاء رفتاری صلب گونه دارند. به همین دلیل تنها خواص الاستیک آن ها در نرم افزار وارد گردید.

#### 4-2-3- روش نگاشت دوباره

به منظور افزایش دقت در شبیه سازی، قسمت انتشار آزاد موج انفجار، یعنی قبل از برخورد موج با ورق های انتهایی، با استفاده از 150 المان یک بعدی اویلری گوه ای مدل سازی شد. هنگامی که جبهه موج به نزدیکی انتهای مدل گوه ای رسید، شبیه سازی متوقف شده و سپس با استفاده از روش نگاشت دوباره<sup>3</sup>، حل یک بعدی به مدل متقارن محوری نگاشته شد. مزیت استفاده از این روش، کاهش زمان محاسبات و افزایش دقت نتایج به دلیل استفاده از شبکه بندی متراکم در مرحله ابتدایی شبیه سازی انفجار است [17]. استفاده از روش نگاشت دوباره در شکل 7 نشان داده شده است.

#### 4-3- شبیه سازی حالت واماندگی

با استفاده از شبیه سازی حالت واماندگی می توان به اطلاعات مناسبی در خصوص مکانیزم واماندگی و عوامل مؤثر بر آن دست یافت. در این پژوهش



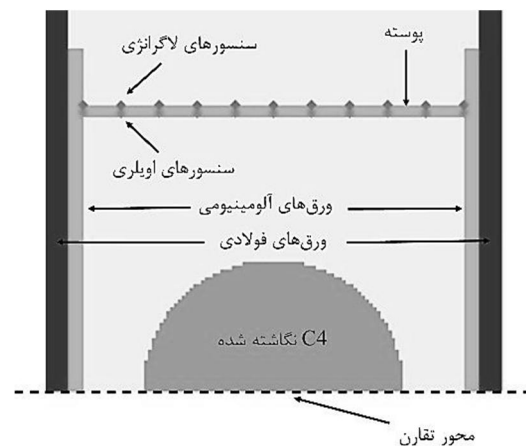
شکل 5 شبکه بندی استفاده شده در شبیه سازی هیدرو دینامیکی سازه ای

بین شبکه بندی اویلری و لاگرانژی قید برهمکنش تعریف گردید. این قید موجب ایجاد مکانیزمی برای مدل نمودن برهمکنش سیال و جامد می گردد. دستور معادل این قید در نرم افزار، دستور کوپلینگ اویلر-لاگرانژ و از نوع اتوماتیک است. برای مدل نمودن اتصال پوسته به ورق، گره های مشترک استوانه و ورق های آلومینیومی به یکدیگر متصل شد. همچنین بین ورق های آلومینیومی و ورق های فولادی با استفاده از دستور کوپلینگ لاگرانژ-لاگرانژ تماس تعریف شد. برای در نظر گرفتن اثر چاشنی نیز مقدار 0/7 گرم به مقدار ماده منفجره جدول 3 افزوده شده است.

برای استخراج تاریخچه فشار اعمالی بر سطح داخلی پوسته، از آرایه ای از سنسورهای اویلری استفاده شد. این سنسورها در شبکه بندی اویلری ثابت بوده و تغییرات سرعت، فشار و دیگر مشخصات دینامیکی جریان را اندازه گیری می نمایند. تغییر شکل شعاعی پوسته با استفاده از سنسورهای لاگرانژی اندازه گیری شد. این سنسورها متحرک بوده و تغییر شکل، تغییر سرعت، تغییر مؤلفه های تنش، کرنش و دیگر مشخصات مکانیکی از پیش تعریف شده را اندازه گیری می کنند. سنسورها بر روی سطح خارجی پوسته قرار داده شدند. شکل 6 مدل اختلاف محدود و محل قرارگیری سنسورهای لاگرانژی و اویلری را نشان می دهد.

#### 4-2-1- معادلات حالت

فرض شد که رفتار هوا به صورت گاز کامل<sup>1</sup> است و از معادله حالت گاز کامل برای مدل سازی آن استفاده شد. ماده منفجره C4 نیز توسط معادله حالت JWL مدل سازی شد. معادله حالت JWL توسط رابطه (5) تعریف می شود:



شکل 6 مدل اختلاف محدود

2- Johnson-Cook  
3- Remapping

1- Ideal gas



آسیب شده اند، از دامنه مسئله حذف می شوند. المان های حذف شده، ترک ها و آسیب های ایجاد شده را شکل می دهند [19]. استفاده از دو روش دیگر مستلزم تعریف ترک اولیه بوده و بیشتر در حوزه مکانیک شکست کاربرد دارند که در اینجا مدنظر نیست.

#### 4-3-1- مدل سازی

از نرم افزار المان محدود آباکوس برای مدل سازی حالت واماندگی استفاده گردید. پوسته استوانه ای با استفاده از المان های پوسته و با 5 نقطه انتگرال گیری در طول ضخامت مدل سازی شد. از مدل پلاستیسیته جانسون- کوک برای رفتار پلاستیک ماده استفاده شد. ورق های آلومینیومی متصل به ورق های فولادی با المان های صلب مدل سازی شد. این ورق ها نیز توسط قید tie به لبه های پوسته متصل شدند. همچنین از تغییر مکان عمودی این ورق ها جلوگیری شد. این قید شرایطی شبیه به جوش در محل اتصال فراهم می آورد. شکل 8 مدل المان محدود را نشان می دهد.

#### 4-3-2- اعمال پروفیل فشار

برای کاهش زمان شبیه سازی، مطابق روشی که در مرجع [20] آمده است، تاریخچه اعمال فشار حاصل از انفجار برای 10 سنسور اولبری نشان داده شده در شکل 6 که در فاصله های مساوی در طول پوسته قرار داده شده بود با استفاده از شبیه سازی هیدرودینامیکی-سازمانده انجام شده توسط نرم افزار اتوداین استخراج گردید. سپس سطح داخلی پوسته در نرم افزار آباکوس به 10 قسمت تقسیم بندی شد و تاریخچه زمانی به عنوان یک شرط مرزی به آن اعمال شد. دلیل این تقسیم بندی متفاوت بودن فشار اعمالی به قسمت های مختلف پوسته است. با توجه به اینکه با ایجاد پارگی در پوسته محصولات گازی حاصل از انفجار تخلیه می شود و فاز دوم بارگذاری به وجود نمی آید، فقط فاز اول نمودار فشار بر حسب زمان در نرم افزار وارد شد.

#### 4-3-3- تعریف معیار واماندگی

آباکوس توانایی شبیه سازی آسیب و شکست در فلزات شکل پذیر را دارد که شامل معیارهای شروع آسیب<sup>4</sup> و تکامل آسیب<sup>5</sup> است [21]. در این نوع مدل سازی، معیار تکامل آسیب نیز باید همراه با معیار شروع آسیب مورد استفاده قرار گیرد. معیار تکامل آسیب نرخ کاهش سختی<sup>6</sup> ماده را هنگامی که معیار شروع آسیب به حد نهایی خود می رسد تعیین می کند. در این صورت حذف المان از دامنه مسئله در صورتی انجام می گیرد که هر دو معیار شروع آسیب و تکامل آسیب به مقدار بحرانی خود برسند. هنگامی که همزمان با



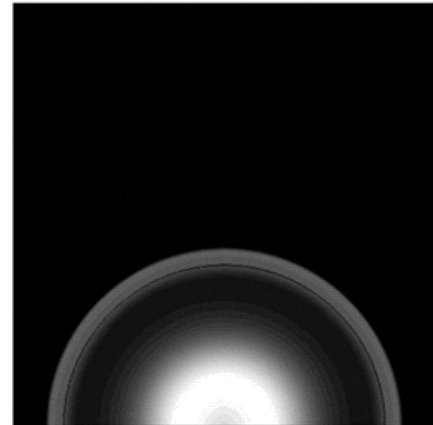
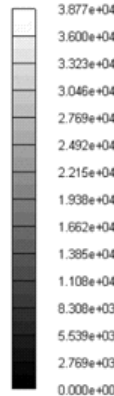
شکل 8 مدل المان محدود

4- Damage initiation  
5- Damage Evolution  
6- Stiffness degradation rate



الف

فشار (kPa)



ب

شکل 7 روش نگاشت دوباره الف المان های گوه ای ب) نگاشت به فضای دوبعدی

جدول 4 ضرایب معادله حالت JWL برای C4 [17]

$\omega$	انرژی CJ		فشار CJ (MPa)
	سرعت انفجار CJ (m/s)	بر واحد حجم (kJ/m <sup>3</sup> )	
0/25	8193	$9 \times 10^6$	$2/8 \times 10^4$
$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (MPa)	B (MPa)	$R_1$
1601	$6/0977 \times 10^5$	$1/295 \times 10^4$	4/5
			$R_2$
			1/4

جدول 5 ضرایب معادله حالت گاز کامل برای هوا [17]

$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$	$T_0$ (K)	$C_p$ (J/kgK)	$E_0$ (J/kg)
1/225	1/4	288/2	717/6	$2/068 \times 10^5$

جدول 6 ضرایب مدل جانسون- کوک برای آلومینیوم 6063-T5 [18]

A (MPa)	B (MPa)	n	m	C	$T_{melt}$ (K)	$\epsilon_0$
170	64	0/7	1/09	0/0036	849	1

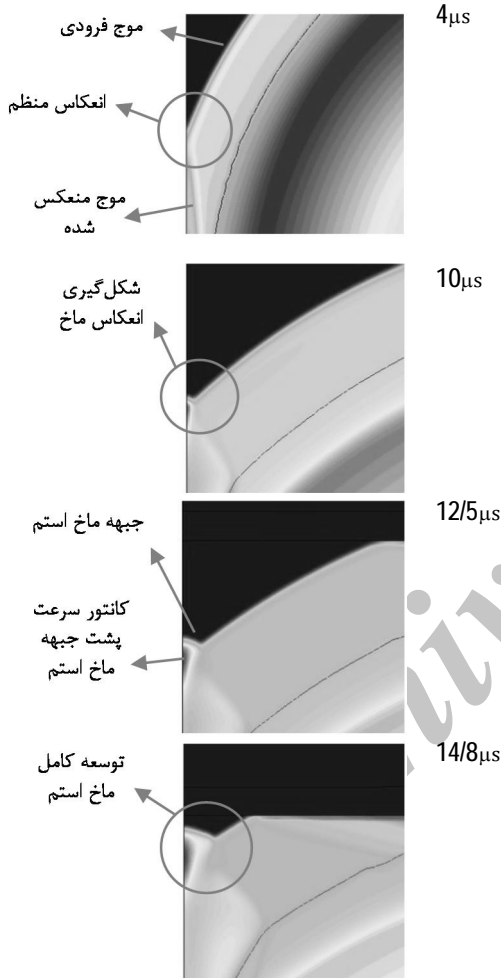
تغییر شکل پوسته استوانه ای تحت بارگذاری انفجاری داخلی، تحت سه حالت کلی زیر طبقه بندی می شود:

- حالت I - تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه بدون ایجاد پارگی
  - حالت II - پارگی موضعی ایجاد شده در پوسته بر اثر افزایش کرنش محیطی
  - حالت III - پارگی در محل اتصال ورق به پوسته
- در این پژوهش حالت I به عنوان عملیات شکل دهی موفقیت آمیز تلقی شده و مطلوب است. حالت های II و III به عنوان حالت واماندگی معرفی می شوند. با استفاده از روش المان محدود می توان حالت های II و III را که شامل مدل سازی شکست و ایجاد پارگی است شبیه سازی نمود. در روش المان محدود مدل سازی شکست با استفاده از سه روش حذف المان<sup>1</sup>، استفاده از المان های چسباننده<sup>2</sup> و استفاده از توابع ناپوسته غنی شده<sup>3</sup> انجام می شود. در روش حذف المان، المان هایی که بر مبنای معیار از پیش تعریف شده ای دچار

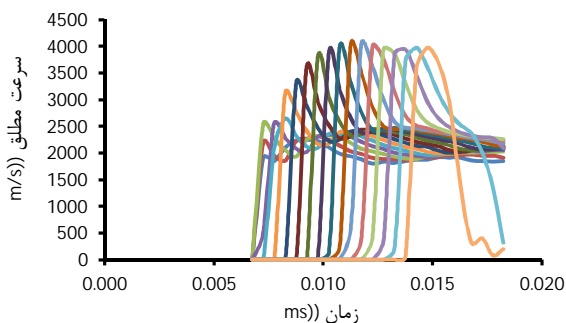
1- Element deletion  
2- Cohesive  
3- Discontinuous enrichment functions

استخراج شده است. مشاهده می شود ابتدا انعکاس منظم اتفاق افتاده است و 10 میکروثانیه پس از شروع انفجار، این انعکاس به انعکاس ماخ تبدیل شده و ماخ استم تشکیل می گردد. ماخ استم شبیه سازی شده دارای شکل منحنی است. همچنین کانتور سرعت مطلق پشت جبهه ماخ استم بزرگتر از موج فرودی است. با توجه به مطالب ذکر شده در بخش 2، پدیده انعکاس ماخ به طور صحیح شبیه سازی شده است.

شکل 10 نشان دهنده تغییرات سرعت مطلق ماخ استم در مسیر پیشروی آن و در فواصل مساوی است. مشاهده می شود پس از تشکیل ماخ استم سرعت مطلق آن افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت می رسد. در بررسی مکانیزم آسیب رسانی موج انفجار توجه به این موضوع بسیار مهم است.



شکل 9 شکل گیری و توسعه ماخ استم در زمان های متفاوت همراه با کانتور سرعت مطلق



شکل 10 تغییرات سرعت ماخ استم در مسیر پیشروی آن

معیار شروع آسیب از معیار تکامل آسیب نیز استفاده شود، المان های آسیب دیده به یکباره حذف نمی شوند و از ناپایداری دینامیکی جلوگیری می شود. مدل واماندگی جانسون-کوک برای معیار شروع آسیب انتخاب شد. این مدل برای پیش بینی شروع آسیب در فلزاتی که تحت بارگذاری های با نرخ کرنش بالا و تغییرات دما قرار می گیرند مناسب است. این مدل توسط رابطه (7) تعریف می شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_f} \quad (7)$$

$$\epsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 + D_5 T^* \right]$$

D پارامتر آسیب بوده و واماندگی هنگامی اتفاق می افتد که  $D=1$ . نشان دهنده محوری بودن تنش<sup>1</sup> بوده و بیانگر نسبت تنش مؤثر به تنش هیدرواستاتیک است.  $D_1$  تا  $D_5$  ضرایب مربوط به ماده می باشند. در این پژوهش به دلیل نبود ضرایب مذکور برای آلومینیوم 6063-T5، از اثرات  $\sigma^*$ ، نرخ کرنش و دما صرف نظر گردید و برای ضرایب  $D_2$  تا  $D_5$  عدد صفر در نرم افزار وارد شد. ضریب  $D_1$  از مرجع [22] انتخاب شده است و مقدار آن برابر 0/2 در نظر گرفته شد.

از انرژی شکست به عنوان معیار تکامل آسیب استفاده شد. این معیار به عنوان یک مشخصه ماده، با مفهوم نرخ رهایش انرژی<sup>2</sup> در مکانیک شکست سازگاری دارد. نرخ رهایش انرژی از رابطه (8) محاسبه شد. در این رابطه  $K_{IC}$  چقرمگی شکست<sup>3</sup> و E مدول یانگ ماده است. چقرمگی شکست آلومینیوم 6063-T5 برابر  $25/2 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  است که از مرجع [23] انتخاب شده است.

$$G_I = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (8)$$

البته باید توجه داشت که رابطه (8) مربوط به نرخ رهایش انرژی در حالت تنش صفحه ای است و باید در آن از مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در حالت تنش صفحه ای ( $K_{IC}$ ) به جای چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) استفاده شود؛ اما در مراجع موجود،  $K_{IC}$  برای آلومینیوم مورد استفاده در این آزمایش یافت نشد و به تقریب در رابطه (8) جایگزین  $K_{IC}$  شد [24]. همچنین فرض شد که در طول فرایند چقرمگی شکست ماده ثابت می ماند و مستقل از نرخ کرنش است.

## 5- تحلیل و بررسی نتایج

### 5-1- شکل گیری انعکاس ماخ و توزیع پروفیل فشار

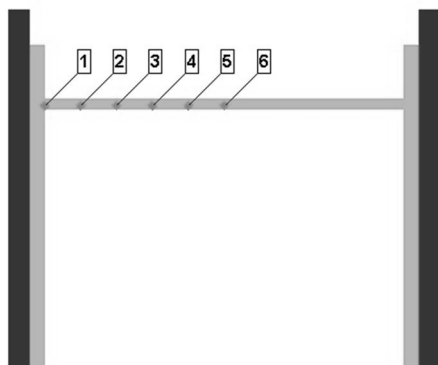
پس از وقوع انفجار در داخل پوسته، موج شوک تشکیل شده و قسمتی از موج فرودی ابتدا به ورق های انتهایی رسیده و بازتابیده می شود. بخش دیگر موج فرودی به سطح داخلی پوسته برخورد نموده و باعث ایجاد یک موج فشاری در آن می شود. به دلیل فضای بسته نمونه ها، بازتابش دوباره امواج اتفاق خواهد افتاد و موجب ایجاد زنجیره ای از امواج می گردد. به دلیل برگشت ناپذیری ترمودینامیکی، بیش فشار امواج منعکس شده پس از هر بازتاب کاهش یافته و در نهایت به یک فشار شبه استاتیک تبدیل می شود.

انعکاس ماخ بر روی ورق های انتهایی تشکیل می شود. شکل 9 شکل گیری و توسعه انعکاس ماخ برای انفجار 5 گرم ماده منفجره در نمونه شماره 1 را همراه با کانتور سرعت مطلق نشان می دهد. این شکل از هیدروکد اتوداین

1- Stress triaxiality  
2- Energy release rate  
3- Fracture toughness

جدول 7 عدد ماخ موج فرودی در لحظه شکل گیری ماخ استم

شماره نمونه	جرم ماده منفجره (g)	فاصله مقیاس شده (m/kg <sup>1/3</sup> )	عدد ماخ با استفاده از رابطه (2)	عدد ماخ با استفاده از شبیه ساز عددی	تفاوت (%)
شماره 1	5	0/37656	7/86	7/68	2/2
شماره 1	6	0/35681	8/17	8/10	0/8
شماره 1	7	0/34064	8/43	8/58	1/7
شماره 1	8	0/32706	8/67	8/99	3/7
شماره 2	3	0/33119	8/60	8/36	2/8
شماره 2	4	0/30580	9/08	8/87	2/3
شماره 2	5	0/28676	9/47	9/16	3/2
شماره 2	6	0/27172	9/80	9/44	3/6



شکل 12 محل قرار گیری سنسورهای اولبری

که مربوط به انفجار 5 گرم ماده منفجره در نمونه شماره 1 است، در شکل های 13-الف تا 13-پ نشان داده شده است.

در شکل 13 هر دو فاز بارگذاری مربوط به انفجار داخلی یعنی پالس های انعکاسی و ایجاد فشار شبه استاتیک به خوبی دیده می شود. در این نمودارها بالاترین مقدار پالس فشاری مربوط به اولین انعکاس بوده و در انعکاس های بعدی به ترتیب این مقدار کاهش می یابد. زمان استمرار<sup>1</sup> هر پالس انعکاسی تقریباً ثابت مانده و پس از سومین یا چهارمین انعکاس، فاز دوم بارگذاری آغاز شده است. مقدار فشار اولین پالس انعکاسی در گوشه پوسته (سنسور شماره 1) بیش از دو برابر بقیه سنسورها است. فشار بالای ایجاد شده در این ناحیه به دلیل برخورد ماخ استم به آن و همچنین تمرکز فشار به دلیل موقعیت هندسی آن است. شکل 14 کانتور فشار در گوشه پوسته را پس از انعکاس ماخ استم از آن نشان می دهد.

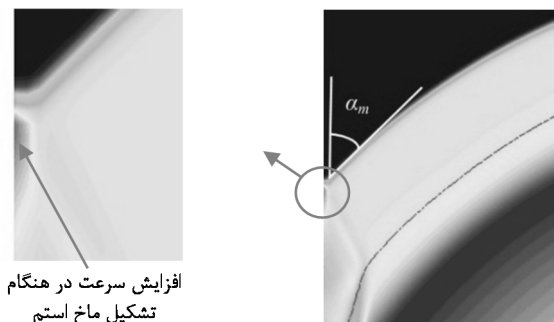
در تمامی شبیه سازی های انجام شده، تشکیل ماخ استم مشاهده شد. در شکل 11 نحوه اندازه گیری زاویه انتقال نشان داده شده است. زاویه انتقال هنگامی که ماخ استم از لحاظ ظاهری شروع به تشکیل شدن نموده و کانتور سرعت پشت جبهه موج از موج فرودی بیشتر گردید، اندازه گیری شد. مقدار این زاویه برای همه مدل ها برابر 42° بود.

برای بررسی صحت نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در این قسمت، عدد ماخ موج فرودی در لحظه تشکیل ماخ استم، توسط رابطه (2) محاسبه شد و با مقادیر عدد ماخ به دست آمده از شبیه سازی مقایسه گردید. با توجه به اینکه ماخ استم بر روی ورق های انتهایی تشکیل می شود، فاصله مکان تشکیل ماخ استم تا مرکز انفجار (R) با استفاده از شبیه سازی اندازه گیری شد و با توجه به آن، فاصله مقیاس شده توسط رابطه (4) محاسبه گردید. این فاصله برای نمونه شماره 1، 65/3 میلی متر و برای نمونه شماره 2، 51/2 میلی متر از مرکز انفجار است. لازم به ذکر است که برای استفاده از رابطه (2) قدرت انفجاری C4، 1/34 برابر قدرت انفجاری همان مقدار TNT در نظر گرفته شد. جدول 7 عدد ماخ موج فرودی را برای آزمایش های انجام شده نشان می دهد. مشاهده می شود که در تمام مدل ها عدد ماخ محاسبه شده در این نقطه بسیار به هم نزدیک بوده و صحت نتایج به دست آمده مورد تأیید است.

در این مسئله محاسبه زاویه انتقال توسط رابطه (1)، تقریب مناسبی است. چرا که ماخ استم بر روی صفحات انتهایی متصل به پوسته تشکیل می شود و هندسه آن مسطح بوده و شرایط شبیه به انفجار بالای سطح زمین ایجاد می شود. زاویه انتقال محاسبه شده توسط شبیه سازی عددی (42°) نیز همخوانی خوبی با زاویه محاسبه شده توسط رابطه (2) (40°) دارد. این نتایج نشان می دهد که در شوک های قوی، شکل گیری ماخ استم تنها به زاویه برخورد موج فرودی بستگی دارد و مستقل از مقدار ماده منفجره است. علاوه بر آن، استفاده از شبیه سازی به روش ذکر شده اطلاعات خوبی در خصوص پدیده انعکاس موج و فرایند شکل گیری ماخ استم ارائه می دهد. در حالی که در روش های دیگر تجزیه و تحلیل این پدیده مشکل تر و گاهی غیرممکن است.

چالش برانگیزترین موضوع در بررسی مسائل انفجار داخلی استخراج تاریخچه فشار در قسمت های مختلف سازه است. فشار انعکاسی ایجاد شده در سطح داخلی پوسته توسط سنسورهای اولبری که در شکل 12 نشان داده شده اند، اندازه گیری شد.

برای نمونه نمودار فشار انعکاسی بر حسب زمان برای سنسور های 1، 3 و 6



شکل 11 اندازه گیری زاویه انتقال همراه با کانتور سرعت مطلق

1- Duration



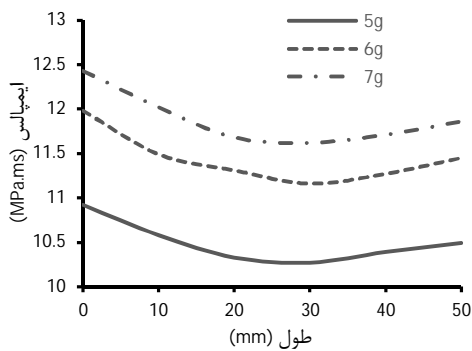
$$I = \int_{t_a}^{t_b+T} p(t) dt \quad (9)$$

در این رابطه  $I$  نشان دهنده ایمپالس،  $t_a$  زمان رسیدن موج،  $t$  زمان و  $p(t)$  شکل تابعی فشار بر حسب زمان است. اغلب میزان مؤثر بودن موج انفجار با مقدار ایمپالس آن تخمین زده می‌شود.

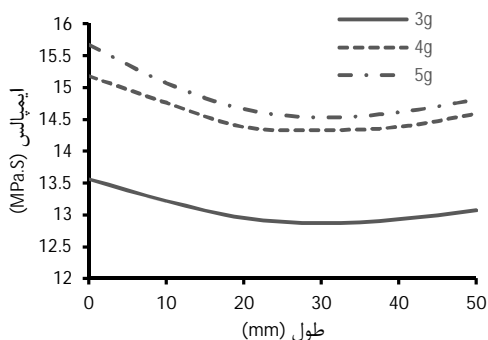
توزیع ایمپالس سنسورهای 1 تا 6 در نیمه طول پوسته‌های شماره 1 و 2 به ترتیب در شکل‌های 15 و 16 نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، بیش‌ترین مقدار ایمپالس در گوشه‌ها دیده می‌شود. با حرکت از گوشه‌ها به سمت سنسور شماره 6 ایمپالس ابتدا کاهش یافته تا به سنسور شماره 3 برسد. سپس مقدار آن افزایش می‌یابد تا به سنسور شماره 6 که نزدیک‌ترین نقطه به مرکز انفجار است می‌رسد. ایمپالس محاسبه شده، متشکل از ایمپالس حاصل از پالس‌های انعکاسی و ایمپالس مربوط به فشار شبه استاتیکی است. از آنجا که ایمپالس مربوط به فشار هیدرواستاتیکی تمامی سنسورها برابر است، اختلاف ایمپالس سنسورها به پالس‌های انعکاسی مربوط است. این الگوی توزیع ایمپالس یافتن یک رابطه تحلیلی برای پروفیل فشار را محدود می‌سازد.

### 5-2- بررسی حالات تغییر شکل پوسته‌ها

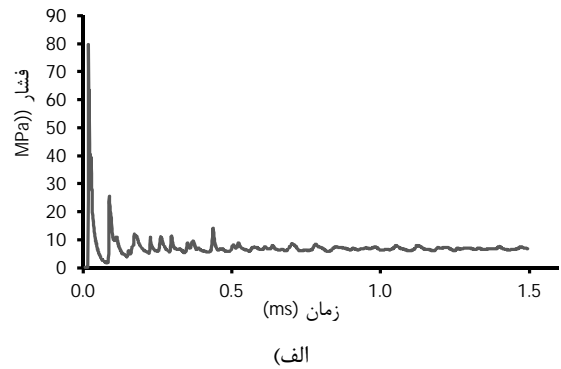
بیشینه تغییر شکل به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با استفاده از هیدروکد اتوداین و آزمایش‌های تجربی در جدول 8 نشان داده شده است. تغییر شکل بیشینه تمامی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه CMM و در میانه پوسته اندازه‌گیری شده است [8]. مقدار متوسط تفاوت بین نتایج این پژوهش و نتایج آزمایش‌ها 6/7% است. نکته دیگر که به تأیید صحت شبیه‌سازی کمک می‌کند تغییر تصادفی<sup>1</sup> داده‌های عددی استبه‌طوری که برخی از آن‌ها دارای مقادیر بالاتر و برخی پایین‌تر از نتایج آزمایش‌ها است.



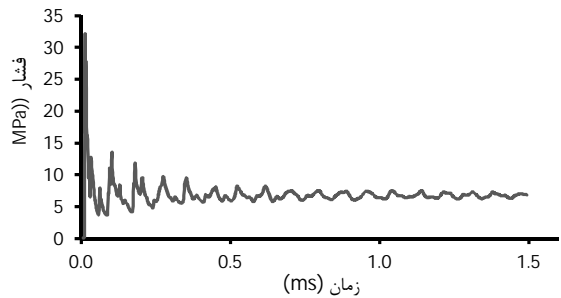
شکل 15 توزیع ایمپالس در نیمه نمونه شماره 1



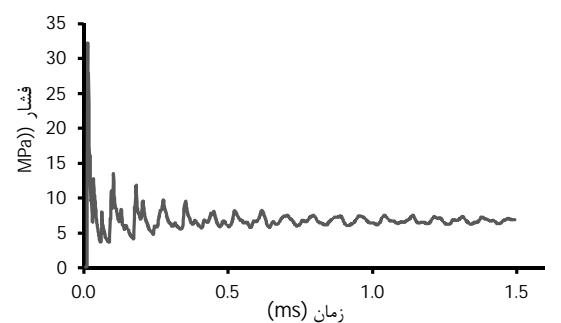
شکل 16 توزیع ایمپالس در نیمه نمونه شماره 2



(الف)

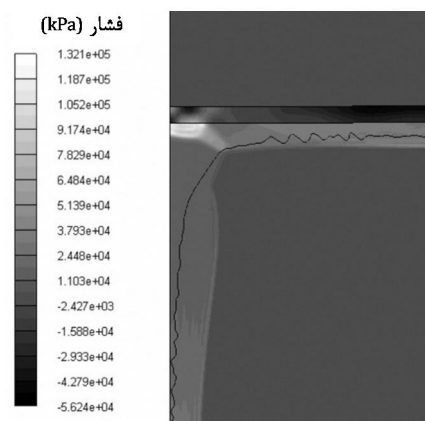


(ب)



(پ)

شکل 13 نمودار فشار انعکاسی بر حسب زمان (الف) سنسور شماره 1، (ب) سنسور شماره 3، (پ) سنسور شماره 6



شکل 14 کانتور فشار در گوشه پوسته پس از انعکاس ماخ استم از آن

به منظور مقایسه اثرات فشار اعمال شده بر سنسورها، ایمپالس آن‌ها توسط نرم‌افزار اتوداین محاسبه شد. ایمپالس موج انفجار سطح زیر نمودار فشار بر حسب زمان بوده و توسط رابطه (9) بیان می‌شود.

مشاهده می‌شود که نتایج عددی مربوط به آزمایش‌هایی که در آن‌ها از ماده منفجره کمتر استفاده شده است، همگرایی بیشتری با نتایج آزمایشی دارند. در نمونه شماره 2 تحت انفجار 5 گرم ماده منفجره، تفاوت نتایج 0/1% شد. با توجه به طبیعت انفجار این مقدار کم تفاوت، غیر قابل انتظار بود. بیشینه تغییر شکل نمونه‌های شماره 1 و شماره 2 به ترتیب 13/92 و 14/04 میلیمتر بوده است. این مقادیر بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و نشان دهنده حد نهایی شکل‌پذیری پوسته هستند.

در برخی از نمونه‌های آزمایش شده که در آن‌ها پوسته با استفاده از یک پاس جوش به ورق‌های آلومینیومی متصل شده بود، حالت III تغییر شکل اتفاق افتاد. در این نمونه‌ها، پیش از ایجاد حالت I تغییر شکل، در محل اتصال ورق به پوسته‌پارگی همراه با تغییر شکل موضعی رخ داد. این حالت، در شکل 17 نشان داده شده است. دلیل آن تنش بالای ایجاد شده در این ناحیه بر اثر تمرکز تنش، برخورد ماخ استم و فشار موضعی بالای ایجاد شده مطابق شکل 14 است. ماخ استم موجب ایجاد شکست در جوش و خروج محصولات حاصل از انفجار می‌شود. به همین دلیل تکمیل فرایند تغییر شکل پلاستیک که با پالس‌های انعکاسی و فاز دوم بارگذاری مرتبط است به طور کامل انجام نمی‌شود.

از سوی دیگر، در پوسته‌هایی که از دو پاس جوشبرخوردار بودند،

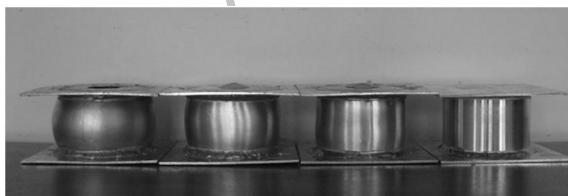
جدول 8 بیشینه تغییر شکل عددی با نتایج تئوری و تجربی

نمونه	جرم ماده منفجره (g)	تغییر شکل تجربی (mm) [8]	بیشینه تغییر شکل عددی (mm)	تفاوت نتایج عددی و تجربی (%)
شماره 1	5	4/5	4/72	4/44
شماره 1	6	7/57	7/87	3/96
شماره 1	7	13/92	11/79	15/3
شماره 2	3	6/9	6/41	7/1
شماره 2	4	9/26	8/44	8/85
شماره 2	5	14/04	14/02	0/1

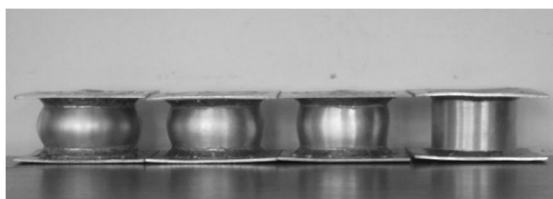
مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت II تغییر شکل، یعنی ایجاد پارگی طولی، با آزمایش‌های انجام شده اطلاعات مناسبی در خصوص این حالت واماندگی فراهم می‌کند. حالت II تغییر شکل در نمونه‌های شماره 1 و شماره 2 به ترتیب بر اثر انفجار 8 و 6 گرم ماده منفجره ایجاد شد. نتایج شبیه‌سازی حالت واماندگی نمونه‌ها همراه با توزیع کانتور شروع آسیب جانسون-کوک و نمونه‌های آزمایش شده در شکل 19 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها از لحاظ ظاهری توافق خوبی دارند؛ اما دو تفاوت عمده در آن‌ها قابل مشاهده است: 1- تعداد پارگی‌های طولی ایجاد شده در شبیه‌سازی بیشتر از تعداد پارگی‌های ایجاد شده در آزمایش است. 2- حالت واماندگی به دست آمده از شبیه‌سازی نشان دهنده ایجاد همزمان حالت تغییر شکل II و III است اما در نمونه‌های آزمایش شده حالت تغییر شکل III دیده نمی‌شود.

این تفاوت‌ها به آن دلیل است که:

1- همراه با انبساط پوسته و انتشار امواج فشاری در راستای ضخامت پوسته و برهم‌نهی امواج کششی ایجاد شده، ترک‌های ریزی بر روی سطوح داخلی و خارجی آن ایجاد می‌شود. قسمت عمده محصولات گازی پرفشار حاصل از انفجار در این ترک‌ها متمرکز شده و از آن‌ها خارج می‌شوند. این امر موجب رشد این ترک‌ها و ایجاد پارگی‌های طولی در پوسته و جلوگیری از ایجاد ترک‌های جدید می‌شود؛ اما در شبیه‌سازی، به دلیل آن که فشار ایجاد شده بر اثر انفجار به عنوان شرط مرزی بر روی سطح داخلی پوسته اعمال شده است، با حذف المان‌های یک ناحیه و ایجاد پارگی طولی، فشار اعمال شده بر قسمت‌های دیگر کاهش نمی‌یابد. به همین دلیل تعداد پارگی‌های ایجاد شده بیشتر است. همچنین خروج محصولات گازی موجب تغییر شکل پلاستیک بیشتر و باز شدن دهانه پارگی‌های می‌شود. علاوه بر این در مدل‌سازی حالت واماندگی به دلیل دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز برای آلیاژ آلومینیوم



(الف)



(ب)

شکل 18 نمونه‌های شکل‌دهی شده (الف) نمونه شماره 1، (ب) نمونه شماره 2



شکل 17 پارگی در محل اتصال ورق به پوسته

پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه را تأیید می‌کند. البته باید توجه داشت که صفحات فولادی با ایجاد نیروی محوری، به طور کلی موجب تقویت تکیه‌گاه می‌شود اما در اینجا ماخ استم به صورت موضعی به محل اتصال ورق به پوسته وارد شده و موجب ایجاد پارگی در جوش می‌شود و لذا تکیه‌گاه باید به صورت موضعی تقویت شود.

### 6- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی ایجاد انعکاس ماخ در شکل‌دهی انفجاری آزاد پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی به روش لاگرانژی-اویلری کوپل شده انجام شد. نسبت قطر به طول این پوسته‌ها برابر  $1/5$  بوده و دو انتهای آن‌ها با ورق‌های صلب مسدود شده بود. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در این حالت انعکاس ماخ بر روی ورق‌های انتهایی اتفاق افتاده است. مشخص شد که روابط مربوط به تشکیل ماخ استم در انفجار بالاتر از سطح زمین، در این حالت نیز معتبر است. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان اطلاعات مناسبی در خصوص پدیده انعکاس امواج حاصل از انفجار و ردیابی انعکاس آن به دست آورد.

- در ناحیه‌ای که تحت تأثیر ماخ استم قرار می‌گیرد، بیشینه فشار ایجاد شده بیش از دو برابر دیگر نقاط است. همچنین توزیع ایمپالس بر روی سطح پوسته غیر یکنواخت بوده و بیش‌ترین مقدار ایمپالس به ترتیب در گوشه‌ها و مرکز پوسته مشاهده شد.

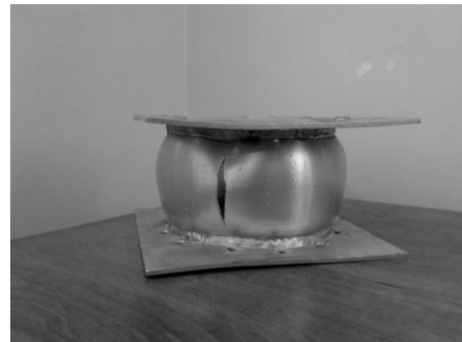
- در نمونه‌هایی که به طور کامل شکل‌دهی شده بودند (حالت تغییر شکل I)، بیشینه‌ی تغییر شکل به دست آمده از شبیه‌سازی توافق خوبی را با آزمایش‌ها نشان داد. مقدار متوسط این تفاوت برای آزمایش‌های مختلف 6/7% بود.

- در نمونه‌هایی که در آن‌ها اتصال پوسته به ورق‌های انتهایی ضعیف بود، تأثیر مخرب ماخ استم، تمرکز تنش و لغزش برشی در تکیه‌گاه‌ها علت ایجاد حالت تغییر شکل III، یعنی پارگی در محل اتصال تشخیص داده شد.

- حالت واماندگی به دست آمده از شبیه‌سازی نشان دهنده حالت تغییر شکل II و III بود اما در نمونه‌های آزمایش شده حالت تغییر شکل III دیده نشد. دلیل عدم مشاهده این حالت در آزمایش‌ها، استفاده از دو پاس جوش برای اتصال پوسته به ورق‌های انتهایی است. همچنین نتایج حاصل شده، لزوم استفاده از تکیه‌گاه‌های تقویت شده در فرایند شکل‌دهی انفجاری پوسته‌های استوانه‌ای کوتاه را تأیید می‌کند.

### 7- لیست علائم و نشانه‌ها

پارامتر آسیب	$D$
قطر استوانه (m)	$d$
انرژی ماده منفجره (kJ)	$e$
مدول یانگ (GPa)	$E$
نرخ رهایش انرژی در حالت کرنش صفحه‌ای (J)	$G_{ic}$
نرخ رهایش انرژی در حالت تنش صفحه‌ای (J)	$G_c$
ایمپالس (MPa.ms)	$I$
نسبت ظرفیت حرارتی	$K$
چقرمگی شکست ( $MPa\sqrt{m}$ )	$K_{Ic}$
مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در حالت تنش صفحه‌ای ( $MPa\sqrt{m}$ )	$K_{IIc}$



(الف)



(ب)

شکل 19 نتایج شبیه‌سازی حالت واماندگی (بالا) و آزمایش (پایین) الف) نمونه شماره 1، ب) نمونه شماره 2

استفاده شده، از اثرات نرخ کرنش در محاسبه معیار شروع آسیب (رابطه 7) صرف‌نظر شد. از آنجا که در عمده مواد شکل‌پذیر از جمله آلومینیوم، افزایش نرخ کرنش موجب افزایش تنش شکست ماده می‌گردد، صرف‌نظر از این اثر موجب ایجاد پارگی‌های بیشتر شده است.

2- در آزمایش‌های انجام شده از دو پاس جوش برای اتصال ورق به پوسته استفاده شد. همان‌گونه که پیش از این بحث شد، این جوش موجب ایجاد یک تکیه‌گاه موضعی قوی در محل اتصال شده و از پارگی در این ناحیه جلوگیری می‌کند. در شبیه‌سازی‌ها این تکیه‌گاه مدل نشده است و پارگی کامل محیطی در محل اتصال اتفاق افتاده است. این نتایج ضرورت وجود تکیه‌گاه‌های تقویت شده در محل اتصال پوسته به ورق در شکل‌دهی انفجاری

[8] J. Zamani Ashani, V. Hadavi, A. Mozaffari, Theoretical calculation of the maximum radial deformation of a cylindrical shell under explosive forming by a new energy approach, *Journal of Mechanical Engineering Science*, No.226, pp.576-584, 2012.

[9] E. Sheibani, M. Mirzaei, Numerical analysis of mechanical and thermal stress in thin cylindrical tube under internal gaseous detonation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 112-121, 2012. (In Persian)

[10] P. D. Smith, J. G. Hetherington, *Blast and ballistic loading of structures*, pp. 63-88, Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.

[11] G. Ben-dor, *Shock wave reflection phenomena*, 2<sup>nd</sup> edition, pp.9-47, Berlin: Springer-Verlag, 2007.

[12] C. E. Needham, *Blast waves*, pp. 171-199, Berlin: Springer-Verlag, 2010.

[13] G. Ben-dor, O. Igra, T. Elperin, *Handbook of shock waves*, Vol.2, pp. 441-481, NewYork: Academic press, 2001.

[14] S. Glasstone, P. J. Dollan, *The effect of nuclear weapons*, 3<sup>rd</sup> edition, p. 89, The united states department of defense and The united states department of energy, 1977.

[15] M. S. Ivanov, D. Vandromme, V. M. Fomin, A. N. Kudryavtsev, A. Hadjadj, D. V. Khotyanovsky, Transition between regular and Mach reflection of shock waves: new numerical and experimental results, *Shock Waves*, No.11, pp.199-207, 2001.

[16] G. F. Kinney, K. J. Graham, *Explosive shocks in air*, pp. 69-87 NewYork: Springer-Verlag, 1985.

[17] AUTODYN-2D and 3D v6.1 user documentation. Horsham, United Kingdom, Century Dynamics Inc., 2005.

[18] H. Zhu, C. Qin, J. Q. Wang, F. J. Qi, Characterization and simulation of mechanical behavior of 6063 aluminum alloy thin-walled tubes, *Advanced Materials Research*, Vols. 197-198, pp. 1500-1508, 2011.

[19] E. T. Ooi, Z. J. Yang, Z. Y. Guo, Dynamic cohesive crack propagation modelling using the scaled boundary finite element method, *Fatigue Fracture Engineering Material Structure*, No.35, pp.786-800, 2012.

[20] L. Ma, Y. Hu, J. Zheng, G. Deng, Y. Chen, Failure analysis for cylindrical explosion containment vessels, *Engineering Failure Analysis*, No. 17, pp. 1221-1229, 2010.

[21] *ABAQUS user's and theory manuals*, version 6.11., RI, USA: Dassault Systems, 2011.

[22] D. Varas, R. Zaera, J. Lopez-Puente, Numerical modelling of the hydrodynamic ram phenomenon, *International Journal of Impact Engineering*, No.36, pp.363-374, 2009.

[23] J. A. Henker, V. B. Lawrence, R. G. Forman, An evaluation of fracture mechanics properties of various aerospace materials, in *fracture mechanics: twenty third symposium*, Philadelphia, USA, 1993.

[24] L. Reinhardt, J. A. Cordes, XFEM Modeling of Mixed-Mode Cracks in Thin Aluminum Panels, *Proceedings of the 2010 Simulia Customer Conference*, Providence, RI, 2010.

$l$	طول استوانه (m)
$M$	عدد ماخ
$P$	فشار (Pa)
$P_a$	فشار اتمسفر (Pa)
$R$	فاصله از مرکز ماده منفجره (m)
$ta$	زمان رسیدن موج (ms)
$t$	زمان (ms)
$V$	حجم (m <sup>3</sup> )
$W$	وزن معادل TNT برای ماده منفجره (kg)
$Z$	فاصله مقیاس شده (m/kg <sup>1/3</sup> )

علائم یونانی

$\alpha_m$	زاویه انتقال (°)
$\epsilon_f$	کرنش شکست
$\epsilon_p$	کرنش پلاستیک
$\dot{\epsilon}_p$	نرخ کرنش پلاستیک (1/s)
$\dot{\epsilon}_0$	نرخ کرنش مرجع (1/s)
$\sigma^*$	تنش سه محوری (MPa)

8- مراجع

[1] M. M. Moshksar, S. Borji, End effect in the explosive forming of tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, No.41, pp. 4311-441, 1994.

[2] Z. Rui, T. Zhang, Non-die explosive forming of spherical pressure vessels, *Journal of Materials Processing Technology*, No.41, pp. 341-347, 1994.

[3] R. Zhang, H. Iyama, M. Fujita, T. Zhang, Optimum structure design method for non-die explosive forming of spherical vessel technology, *Journal of Materials Processing Technology*, No.85, pp. 217-219, 1999.

[4] T. Duffey, D. Mitchell, Containment of explosions in cylindrical shells, *International Journal of Mechanical Science*, No.15, pp.237-49, 1973.

[5] F. Fanous, G. Lowell, Simplified analysis for impulsively loaded shells, *Journal of Structural Engineering*, Vol.4, No.114, pp.885-99, 1988.

[6] R. A. Benham, T. A. Duffey, Experimental-theoretical correlation on containment of explosions in closed cylindrical vessels, *International Journal of Mechanical Science*, Pergamon Press, Vol. 16, pp. 549-558, 1974.

[7] J. Lellep, K. Torn, Plastic response of a circular cylindrical shell to dynamic loadings, *International Journal of Impact Engineering*, No.30, pp.555-576, 2004.