ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس



mme.modares.ac.ir

بررسی عددی شکل گیری انعکاس ماخ در شکلدهی انفجاری آزاد پوستههای استوانهای بسته

محمدوهاب موسوى¹، جمال زمانى^{2*}، سىد محمدرضا خلىلى³

1- كارشناس ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، تهران

2- دانشيار، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستى zamani@kntu.ac.ir ،19395-1999

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این پژوهش ایجاد انعکاس ماخ و تأثیر آن در شکل دهی انفجاری آزاد پوستههای استوانهای بسته با استفاده از شبیهسازی عددی بررسی شده است. این پوستهها از آلومینیوم75-6003 اکسترود شده ساخته شده و نسبت قطر به طول آنها 1/5 است. دو انتهای پوستهها نیز با اتصال ورقهای صلب بسته شده است. شبیهسازی عددی شکل گیری انعکاس ماخ و پاسخ پلاستیک پوستهبا استفاده از هدروکد اتوداین و با گسستهسازی لاگرانژی-اویلری کوپل شده انجام شد. شکل گیری انعکاس ماخ بر روی ورقهای انتهایی مشاهده از هدروکد اتوداین و شده در ناحیهای 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 ورقها، پیش از انجام فرایند شکل گیری انعکاس ماخ بر روی ورقهای انتهایی مشاهده از معاص موضعی در محل شده در ناحیهای 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 ورقها، پیش از انجام فرایند شکل دهی میگردد. مقایسه بیشینه تغییرشکلبه دست آمده از این تحقیق با نتایج آزمایشهای انجام شده در آزمایشگاه مکانیک انفجار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی نشان داد که همگرایی میان نتایج تجربی و عددی بیش از 39% است. همچنین با توجه به پیچیدگیهای مربوط به انعکاس وتداخل امواج انفجار، شبیهسازی به دروش لاگرانژی -اویلری کوپل شده روش مناسبی برای بررسی مسائل انفجار داخلی است. علاوه بر آن حالات واماندگی نیز با استفاده از نرمافزار المان محدود آباکوس شبیهسازی 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 <i>واژگان:</i> شکل دهی انفجاری بوسته استوانهای پوسته استوانهای روش لاگرانژی -اویلری کوپل شده

Numerical investigation of formation of Mach reflection in explosive free forming of confinedcylindrical shells

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

Departmentof 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

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

Available Online 08 October 2014

ABSTRACT

In this research, a Mach reflection and its effect on explosive free forming of confined cylindrical shells are studied numerically. This 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 of internal explosion problems. In addition failure modes was simulated with finite element software Abaqus and good agreement was found between the results.

بهبود نسبی خواص مکانیکی و متالوژیکی قطعه اشاره کرد [1]. در این فرایند از محیطهای واسط مختلف مانند هوا، آب و دیگر محیطهای 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 شکلدهی انفجاری یکی از روشهای مهم شکلدهی فلزات به شمار میآید. استفاده از این روش در صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی و صنایع شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای آن میتوان به امکان ساخت قطعات بزرگ، کاهش هزینههای ابزارسازی، حفظ تلرانسهای دقیق و نیز

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.V. Mousavi, J. Zamani, S.M.R. Khalili, Numerical investigation of formation of Mach reflection in explosive free forming of confinedcylindrical shells, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 131-142, 2015 (In Persian)

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

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 تغییرشکل پوسته، حالات واماندگی¹و 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 گریمن [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 تغییرشکل نهایی به شکل بیضی می گردد.

بنهم و دافی[6] بیشینه 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 وتورن[7] دریافتند تغییر شکل پوسته استوانهای تحت بارگذاری پالسی با لغزش برشی در تکیه گاهها آغاز می گردد. همچنین با افزایش طول استوانه، اثر لغزش برشی در تغییرشکل کاهش مییابد.

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

کریمی و میرزایی [9] با استفاده از روشالمان محدود، تنشهای مکانیکی و حرارتی در استوانه جدار نازک تحتبارگذاریانفجاری گازیداخلی را محاسبه نمودند. آنها تغییرمکانهای 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 شده²است.برای این منظور از هیدروکد اتوداین³استفاده شد.

2- بار گذاری انفجاری در سازه های 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 می کند 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 می شود[10].

فرايند انعكاس موج شوك، وابسته به هندسه سازه و قدرت موج شوك 6 است. به طور کلی انعکاس موج شوک به انعکاس منظم 5 و انعکاس ماخ تقسیم بندی می شود [11]. انعکاس منظم متشکل از موج فرودی⁷ و موج منعکس شده⁸ است که در نقطه انعکاس متقاطع می شوند. هنگامی که موج منعکس شده به موج فرودی برسد، یک موج متحد تشکیل می شود. این موج متحد ماخ استم ۷ نام دارد. امواج فرودی، منعکس شده و ماخ استم درنقطهای به نام نقطه سهگانه¹⁰ 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 کروی مانند موج حاصل ازانفجار یک خرج کروی تولید می شود، به تقريب دارای هندسه نيم کروی است[13]. با پيشروی موج شوک، ماخ استم بزرگتر می شود. اگر در این حالت در مسیر پیشروی موج سنسورهایی قرار گیرد، سنسوری که پایین تر از نقطه سه گانه قرار دارد، یک فشار را که مربوط به ماخ استم است ثبت می کند و سنسوری که بالاتر از نقطه سه گانه 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 انتقال¹¹ 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 پژوهش های انجام

¹⁻ Failure mode

²⁻ Coupled Lagrangian-Eulerian method 3- Autodyn

نسبت قطر به طول پوستهها برابر 1/5 بوده و دو انتهای آنها با ورقهای صلب مسدود شده است. در این مقاله مکانیزم بارگذاریانفجاری 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، شکل گیری انعکاس ماخ، توزیع فشار و ایمپالس بر روی سطح داخلی پوسته مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته وبیشینه تغییرشکل و به دست آمده از شبیهسازیها با نتایج آزمایشها مقایسه شده است.با توجه به مزیتهای نسبی نرمافزار آباکوس⁴ در شبیهسازی شکست و آسیب،حالت واماندگی پوستهها توسط این نرمافزار مدلسازی و توافق خوبی با آزمایشها مشاهده شد. نتایج به دست آمدهبا ارائه اطلاعات مناسبی از نحوه انتشار و انعکاس امواج شوک حاصل از انفجار داخلی موجب میشود که فیزیک این فرایند بهتر درک شود.

⁴⁻ Abaqus 5- Regular reflection

⁶⁻ Mach reflection

⁷⁻ Incident wave 8- Reflected wave

⁹⁻ Mach stem

¹⁰⁻ Triple point

¹¹⁻ Transition angle



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]



Al Pb Cr Sb Ni Mn Ti Cu Zn Fe Mg Si يايه 0/0020/0020/0030/0060/0080/0170/0620/0720/1760/6880/2		نى	صد وز	سب در	باژ برح	د در آلب	ِ موجو	، عناصر	1تركيب	مدول	÷	
يايە 0/0020/0020/0030/0060/0080/0170/0620/0720/1760/6880/2	AI	Pb	Cr	Sb	Ni	Mn	Ti	Cu	Zn	Fe	Mg	Si
	پايە	0/002	0/002	0/003	0/006	0/008	0/017	0/062	0/072	0/176	0/688	0/2
جدول 2 ابعاد و خواص مکانیکی نمونهها			l	نمونەھ	ئانىكى	واص مک	د و خو	2 ابعا	جدول			

كرنش	_م نسبت	ننش تسلير	دول يانگ	چگالی م	لمخامت	طول ط	قطر خارجي	diani
نهایی	پواسون	(MPa)	(GPa)	(kg/m³)	(mm)	(mm)	(mm)	
0/2	0/2	175	40	2700	2	100	150	شماره 1
0/2	0/5	175	09	2700	3	80	120	شماره 2

شده در این زمینه، بر روی موج شوک صفحهای در جریانهای یکنواخت متمرکز شده است. در این جریانها، عدد ماخ و زاویه برخورد موج شوک ثابت میماند. استخراج معیار تبدیل انعکاس منظم به انعکاس ماخ برای امواج شوک کروی حاصل از انفجار با امواج شوک صفحهای متفاوت است. هنگامی که این امواج انفجار منتشر میشوند، عدد ماخ آنها کاهش یافته و زاویه برخورد موج با سطح افزایش مییابد.شکل 2انتشار یک موج شوک کروی و برخورد آن با سطح تخت در دو زمان متفاوت را نشان میدهد. در ابتدا موج انفجار به صورت منظم منعکس میشود.

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

هنگامی که زاویه برخورد از α_n بزرگتر شود، تشکیل ماخ استم امکانپذیر 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 بزرگتر از 3، با افزایش عدد ماخ، زاویه انتقال تغییرات چندانی نداشته و در حدود °40 است.

برای استفاده از رابطه (1) محاسبه عدد ماخ موج فرودی ضروری است. یک تقریب برای محاسبه عدد ماخ موج فرودی، رابطهای است که توسط کینی و گراهام [16] برای انتشار آزاد موج انفجار در اتمسفر استخراج شده است. این معادله توسط رابطه (2) بیان میشود. *P/P*نسبت بیش فشار¹ موج انفجار به فشار اتمسفر و X نسبت ظرفیت حرارتی هوا استکه در این پژوهش برابر 1/34 در نظر گرفته شده است. رابطه (3) بیش فشار را به صورت تابعی از فاصله مقیاس شده²،7، نشان می دهد. فاصله مقیاس شده توسط رابطه (4) بیان میشود که در آن W وزن معادل TNT برای ماده منفجره استفاده شده و R فاصله از مرکز ماده منفجره است.

$$M = \sqrt{1 + \frac{K+1}{2K} \left(\frac{P}{P_{s}}\right)} = \sqrt{1 + \left(\frac{6P}{7P_{s}}\right)}$$
(2)
$$\frac{P}{P_{s}} = \frac{808 \left[1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^{2}\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^{2}}$$
(3)
$$Z = \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}}$$
(4)

3- آزمایشها

در این پژوهش به منظور صحه 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 نمونههای استفاده شده در این آزمایشها از آلومینیوم T5-6063 اکسترود شده ساخته شد. ترکیب عناصر موجود در این آلیاژکه توسط آزمایش کوانتومتری به دست آمده، در جدول 1نشان داده شده است.

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

¹⁻ Over pressure 2- Scaled distance

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 تغییرشکل پلاستیک در پوسته کافی بوده و به طور پلهای تا ایجاد پارگی¹ در آن افزایش یافت. جرم ماده منفجره مورد استفاده برای هر نمونه درجدول 3 آمده است.

سامانه آزمایش درشکل 4نشان 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 24 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 - شبیه سازی 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. درحالی 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 امکان پذیر 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 مواجه 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



شکل4 سامانه آزمایش **[8]**

جدول3 جرم ماده منفجره مورد استفاده برای هر نمونه

جرم (C4(g	نمونه
5. 6. 7 و 8	شماره 1
3، 4، 5 و 6	شماره 2

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 قابل دیابیاست. همچنین می توان 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 شدهبر روی سازه تغییر شکلپذیر اعمال میگردد. در تحلیلهای کوپل، بار هیدرودینامیکی بهشکل تدریجی وارد شده و در هر گام زمانی، محاسبات هیدرودینامیکی همزمان با محاسبات مربوط به پاسخ سازه تغییرشکلپذیر 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

شبیهسازی هیدرودینامیکی-سازهای به وسیله هیدروکد اتوداین انجام شد. این هیدروکداز روش اختلاف محدود ⁶استفاده نموده، به صورت صریح⁴از زمان انتگرالگیری مینماید وبرای بررسی مسائل دینامیکی غیرخطی مانند ضربه، نفوذ و انفجار مناسب است. استفاده از روشهای گسستهسازی فضایی لاگرانژی⁵ و اویلری⁶ توانایی مدلسازی مسائل پیچیده هیدرودینامیکی شامل برهمکنش سیال و جامد را به این نرمافزار داده است.

در گسسته ازیاویلری مش ها در فضا ثابت بوده و مواد امکان حرکت در میان آنها را دارند. این حلگر برای مدل سازی سیالات و جامداتی که تحت تغییر شکل های بزرگ قرار گرفته اند مناسب است. در گسسته سازیلا گرانژی مواد بر روی مش ها ثابت شده اند و می توانند در طول بار گذاری تغییر شکل دهند. این روش برای مدل سازی جامدات مورد استفاده قرار می گیرد. با کوپل نمودن این دو روش که به روش لا گرانژی - اویلری کوپل شده (CLE) معروف است، می توان به روشی کارا برای مطالعه پاسخ سازه ها در برابر بارهای انفجاری دست یافت.در این روش جامدات توسط شبکه بندی لا گرانژی و سیالات توسط شبکه بندی اویلریمدل سازی می شوند. سپس یک قید برهمکنش بین این دو شبکه بندی تعریف می شود. ا تعریف این قید، مدل سازی برهمکنش سیال با جامد ممکن می شود. از مزایای این روش می توان بهامکان بررسی محسوس تر رفتار مواد منفجره و محیط واسط در حین فرایند انفجار اشاره نمود.

برای کاهش زمان محاسبات، شبیه سازی به صورت متقارن محوری ¹ انجام شد. در این مدل هوا و ماده منفجره C4 به صورت اویلری و پوسته استوانه ی به صورت لاگرانژی مدل گردید. اندازه بهینه شبکههای لاگرانژی و اویلری 1mm×1mm انتخاب شد. شبکه بندی مذکور در شکل 5نشان داده شده است.

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.36.9

1- Rupture

²⁻ Hydrodynamic-Structural 3- Finite difference

⁴⁻ Explicit

⁵⁻ Lagrangian

⁶⁻ Eulerian 7- Axisymmetric



شکل5 شبکه بندی استفاده شده در شبیهسازی هیدرودینامیکی-سازهای

بین شبکهبندی 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، گرههای مشترک استوانه و ورقهای آلومینیومی به یکدیگر متصل شد.همچنین بین ورقهای آلومینیومی و ورقهای 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 آرایهای از سنسورهای اویلری استفاده شد. این سنسورها در شبکهبندی اویلری ثابت بوده و تغییرات سرعت، فشار و دیگر مشخصات دینامیکی جریان را اندازهگیری مینمایند.تغییرشکل شعاعی پوسته با استفاده از سنسورهای لاگرانژی اندازهگیری شد. این سنسورها متحرکبوده و تغییرشکل، تغییر سرعت، تغییر مؤلفههای تنش، کرنش و دیگر مشخصات مکانیکی از پیش تعریف شده را اندازهگیری میکنند. سنسورها بر روی سطح خارجی پوسته قرار داده شدند. شکل **6** مدل اختلاف محدود و محل قرارگیری سنسورهای لاگرانژی و اویلری را نشان میدهد.

4-2-1- معادلات حالت

فرض شد که رفتار هوا به صورت گاز کامل¹است و از معادله حالت گاز کامل برای مدلسازی آن استفاده شد. ماده منفجره C4 نیز توسط معادله حالت JWL مدلسازی شد. معادله حالت JWL توسط رابطه **(5) تعری**ف می شود:



مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13

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

در این رابطه q فشار، V حجم و gچگالی انرژی داخلی بر واحد حجم اولیه ماده منفجره را نشان میدهد. همچنین پارامترهای A، B، R_2 ، R_1 g oاین معادله حالت بوده و از مشخصات ماده منفجره است. ضرایب معادلات حالت برای هوا و A از کتابخانه مواد نرم افزار استخراج گردید. جدولهای f و f به ترتیب ضرایب معادلات حالت JWL و گاز کامل استفاده شده در این پژوهش را نشان میدهند.

4-2-2- مدل مادی

انتخاب مدل مادی مناسب برای شبیه سازی رفتار پلاستیک سازه تحت بارهای دینامیکی با نرخ بالا بسیار مهم است. در اینجا از مدل جانسون -کوک² استفاده شده است. مدل جانسون -کوک تنش جریان را به صورت تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما مطابق رابطه (6) بیان میکند:

$$\sigma = \left[\mathbf{A} + \mathbf{B} \varepsilon_{p}^{\ n} \right] \left[\mathbf{1} + \mathbf{C} \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\dot{\varepsilon}_{0}} \right] \left(\mathbf{1} - \mathbf{T}^{\, \cdot} \right)^{m}$$
(6)
$$\mathbf{T}^{\, \cdot} = \frac{\mathbf{T} - \mathbf{T}_{\text{room}}}{\mathbf{T}_{\text{melt}} - \mathbf{T}_{\text{room}}}$$

در این رابطه σ تنش جریان، ϵ_{0} کرنش پلاستیک، $\frac{\epsilon_{0}}{\epsilon_{0}}$ نرخ کرنش پلاستیک نرمالیزه، T دما، Treet دمای ذوب ماده و Troom دمای محیط است. ضرایب A، B، n، $n \in 2$ ثوابت ماده میباشند. برای آلومینیوم T5-6006 ضرایب A، B و nبا استفاده از نتایج تست کشش انجام شده محاسبه شد. ضریب 2 ثابت مربوط به اثر نرخ کرنش است که از انجام آزمایشهای استاندارد در نرخ کرنشهای بالا به دست میآید. ضرایب 2 و m از مرجع [18] انتخاب شد. جدول 6ثوابت مدل جانسون -کوک استفاده شده در شبیه سازی را نشان میدهد. با ثوجه به اینکه کرنشهای الاستیک ایجاد شده در ورقهای انتهایی و صفحات فولادی فیکسچر در طی آزمایشها بسیار کوچک است،فرض شد که این اجزاء رفتاری صلب گونه دارند. به همین دلیل تنها خواص الاستیک آنها در نرمافزار 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 گوهای مدل سازی شد. هنگامی که جبهه موج به نزدیکی انتهای مدل گوهای رسید، شبیه سازی متوقفشده و سپس با استفاده از روش نگاشت دوباره³، 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.

4-3- شبيهسازي حالت واماندگي

با استفاده از شبیهسازی حالت واماندگی میتوان به اطلاعات مناسبی در خصوص مکانیزم واماندگی و عوامل مؤثر بر آن دست یافت. در این پژوهش

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.36.9

²⁻ Johnson-Cook 3- Remapping



شکل 7روش نگاشت دوباره الف) المانهای گوهای ب) نگاشت به فضای دوبعدی

جدول4 ضرایب معادله حالت JWL برای C4[17]								
ω		رعت انفجار CJ(m/s)		انرژی CJ بر واحد حجم kJ/m³)		فشار (MPa) CJ	à	
0/25		8193	3	9×10 ⁶		2/8×10 ⁴		
ρ ₀ (kg/m ³	B) A	(MPa)	<i>B</i> (M	Pa)	R1	R ₂		
1001	0/0	1977×10	1/295	×IU	4/3	1/4		
[1	جدول 5 ضرایب معادله حالت گاز کامل برای هوا [17]							
$ ho_{0}$ (kg/m	³) γ	To	(K) <i>C</i> ₄	₀(J/kgK)	<i>E₀</i> (J/kg)	_	
1/22	25 1/4	288	3/2	717/	6	2/068 ×10 ⁵		
[18] 60	يوم 5⊤-63	رای آلومین	ون-كوك ب	دل جانسو	يب ما	جدول6 ضرا		
A (MPa)	B (MPa)	n	m		С	T _{melt} (K)	έ ₀	
170	64	0/7	1/09	0/00	36	849	1	

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

حالت I - تغییرشکل پلاستیک قابل ملاحظه بدون ایجاد پارگی

حالت II - پارگی موضعی ایجاد شده در پوسته بر اثر افزایشکرنش محیطی

حالت III - پارگی در محل اتصال ورق به پوسته

در این پژوهش حالت I به عنوان عملیات شکلدهی موفقیت آمیز تلقی شده و مطلوباست. حالتهای II و III به عنوان حالت واماندگی معرفی میشوند.

با استفاده از روش المان محدود می توان حالتهای II و III را که شامل مدلسازی شکست و ایجاد پارگی است شبیه سازی نمود.در روش المان محدود مدل سازی شکست با استفاده از سه روش حذف المان¹، استفاده از المانهای چسباننده² و استفاده از توابع ناپیوسته غنی شده⁸ انجام می شود. در روش حذف المان، المان هایی که بر مبنای معیار از پیش تعریف شده ای دچار

1- Element deletion

آسیب شدهاند، 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- مدلسازى

از نرم افزار المان محدود آباکوس برای مدلسازی حالت واماندگی استفاده گردید. پوسته استوانهای با استفاده از المانهای پوسته و با 5 نقطه انتگرال گیری در طول ضخامت مدلسازی شد. از مدل پلاستیسیته جانسون -کوک برای رفتار پلاستیک ماده استفاده شد. ورقهای آلومینیومی متصل به ورقهای فولادی با المانهای صلب مدلسازی شد. این ورقها نیز توسط قید tie به لبههای پوسته متصل شدند. همچنین از تغییر مکان عمودی این ورقها جلوگیری شد. این قید شرایطی شبیه به جوش در محل اتصال فراهم می آورد.شکل 8 مدل المان محدود را نشان میدهد.

4-3-2- اعمال پروفيل فشار

برای کاهش زمان شبیه سازی، مطابق روشی که در مرجع [20] آمده است، تاریخچه اعمال فشار حاصل از انفجار برای 10 سنسور اویلری نشان داده شده در شکل 6که در فاصله های مساوی در طول پوسته قرار داده شده بود با استفاده از شبیه سازی هیدرودینامیکی-سازه ایانجام 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 قسمتهای 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- تعريف معيار واماندگي

آباکوس توانایی شبیه سازی آسیب و شکست در فلزات شکل پذیر را دارد که شامل معیارهای شروع آسیب⁴ و تکامل آسیب⁵است[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 سفتی⁶ ماده را هنگامی که معیار شروع آسیب به حد نهایی خود می سد 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 بر سند.هنگامی که همزمان با



شكل8 مدل المان محدود

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.13.36.9

²⁻ Cohesive3- Discontinuous enrichment functions

⁴⁻ Damage initiation 5- Damage Evolution

⁶⁻ Stiffness degradation rate

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13

معیار شروع آسیب از معیار تکامل آسیب نیز استفاده شود، المانهای آسیب دیده به یکباره حذف نمیشوند و از ناپایداری دینامیکی جلوگیری میشود.

مدل واماندگی جانسون-کوک برای معیار شروع آسیب انتخاب شد. این مدل برای پیش بینی شروع آسیب در فلزاتی که تحت بارگذاریهای با نرخ کرنش بالا و تغییرات دما قرار می گیرند مناسب است. این مدل توسط رابطه (7) تعریف می شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{p}}{\varepsilon_{r}}$$
$$\varepsilon_{r} = \left[D_{1} + D_{2} \exp(D_{3}\sigma^{*}) \right] \left[1 + D_{4} \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{p}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right) \right]$$
$$\left[1 + D_{5}\tau^{*} \right]$$

D = 1 پارامتر آسیب بوده و واماندگی هنگامی اتفاق میافتد که D = 1. $\overline{\sigma}$ نشاندهندهسه محوری بودن تنش¹ بوده و بیانگر نسبت تنش مؤثر به تنش هیدرواستاتیک است. D_1 تا \overline{c} ضرایب مربوط به ماده میباشند. در این پژوهش به دلیل نبود ضرایب مذکور برای آلومینیوم T5-6063 ، از اثرات σ . نرخ کرنش و دما صرفنظر گردید و برای ضرایب D_2 تا \overline{c} عدد صفر در نرمافزار وارد شد. ضریب D_1 از مرجع [22] انتخاب شده است و مقدار آن برابر 20 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 انرژی²در مکانیک شکست سازگاری دارد. نرخ رهایش انرژی از رابطه (8) محاسبه شد. در این رابطه سازگاری شکست³ و *T* مدول یانگ ماده است. چقرمگی شکست آلومینیوم 55-6003 برابر 25/2**MPa** شده است.

$$G_{I} = \frac{K_{IC}^{2}}{E}$$
(8)

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

5- تحليل و بررسي نتايج

(7)

1-5- 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 بر گشتناپذیری 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 میشود. 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 میدهد. این شکل از هیدروکد اتوداین

استخراج شده است. مشاهده میشود ابتدا انعکاس منظم اتفاق افتاده است و 10 میکروثانیه پس از شروع انفجار، این انعکاس به انعکاس ماخ تبدیل شده و ماخ استم تشکیل میگردد. 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 مطالبذکر شده در بخش 2، پدیده انعکاس ماخ به طور

صحیح شبیهسازی شده است. شکل 10 نشاندهندهتغییرات سرعت مطلق ماخ استم در مسیر پیشروی آن و در فواصل مساوی است. مشاهده میشود پس از تشکیل ماخ استم سرعت مطلق آن افزایشیافته و در نهایت به یک مقدار تقریباً ثابت میرسد. در بررسی مکانیزم آسیبرسانی موج انفجار توجه به این موضوع بسیار مهم است.







¹⁻ Stress triaxiality

²⁻ Energy release rate 3- Fracture toughness

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 شبیهسازی 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 شبیهسازی اندازه گیری شد و با توجه به آن، فاصله مقیاس شده توسط رابطه (4) محاسبه گردید.این فاصله برای نمونه شماره 1، 65/3 میلیمتر و برای نمونه شماره 2، 2/15 میلیمتر از مرکز انفجار است.لازم به ذکر است که برای استفاده از رابطه (2) قدرت انفجاری 20، 174 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 مسطحبوده و شرایطیشبیه 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 شوکهای 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 غیر ممکن است.

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

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



افزایش سرعت در هنگام

تشكيل ماخ استم

محمدوهاب موسوی و همکاران	
--------------------------	--

جدول7 عدد ماخ موج فرودی در لحظه شکل گیری ماخ استم						
تفاوت (%)	عدد ماخ با استفاده از شبیهساز یعددی	عدد ماخ با استفادہ از رابطہ (2)	فاصله مقیاس شده (m/kg ^{1/3})	جرم مادہ منفجرہ (g)	نمونه	
2/2	7/68	7/86	0/37656	5	شمارہ 1	
0/8	8/10	8/17	0/35681	6	شمارہ 1	
1/7	8/58	8/43	0/34064	7	شمارہ 1	
3/7	8/99	8/67	0/32706	8	شمارہ 1	
2/8	8/36	8/60	0/33119	3	شمارہ 2	
2/3	8/87	9/08	0/30580	4	شمارہ 2	
3/2	9/16	9/47	0/28676	5	شمارہ 2	
3/6	9/44	9/80	0/27172	6	شمارہ 2	



شکل 12محل قرارگیری سنسورهای اویلری

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

در شکل 13هر دو فاز بارگذاری مربوط به انفجار داخلی یعنی پالسهای انعکاسی و ایجاد فشار شبه استاتیک به خوبی دیده میشود. در این نمودارها بالاترین مقدار پالس فشاری مربوط به اولین انعکاس بوده و در انعکاسهای بعدی به ترتیب این مقدار کاهش مییابد. زمان استمرار¹ 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 14کانتور فشار در گوشه پوسته را پس از انعکاس ماخ استم از آن نشان میدهد.

¹⁻ Duration

 $I = \int_{t_{s}}^{t_{s}+T} p(t) dt$

در این رابطه *I* نشان دهنده ایمپالس، *t*ونمان 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. همان گونه که انتظار میرود،بیش ترین 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 متشکل از ایمپالس حاصل از پالسهای انعکاسی و ایمپالس مربوط به فشار شبه استاتیک است. از آنجا که ایمپالس مربوط به فشار هیدرواستاتیک تمامی سنسورها برابر است، اختلاف ایمپالس سنسورها به پالسهای انعکاسی مربوط است. این الگوی توزیع ایمپالس یافتن یک رابطه تحلیلی برای پروفیل فشار را

5-2- بررسى حالات تغيير شكل پوستهها

(9)

بیشینه تغییرشکل به دست آمده از شبیهسازی عددی با استفاده از هیدروکد اتوداین و آزمایشهای تجربی در جدول 8 نشان داده شده است. تغییرشکل بیشینه تمامی نمونهها با استفاده از دستگاه CMM و در میانه پوسته اندازه گیری شده است [8]. مقدار متوسط تفاوت بین نتایج این پژوهش و نتایج آزمایشها 70%ست. نکته دیگر که به تأیید صحت شبیهسازی کمک می کند تغییر تصادفی¹ دادههای عددی استبهطوری که برخی از آنها دارای مقادیر بالاتر و برخی پایین در از نتایج آزمایشها است.



1- Random



شکل 13 نمودار فشار انعکاسی بر حسب زمان الف) سنسور شماره 1، ب) سنسور شماره 1 ماره 1، ب) 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 برحسب زمان بوده و توسط رابطه (9) بیان میشود.

مشاهده می شود که نتایج عددی مربوط به آزمایش هایی 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 1/0% شد. با توجه به طبیعت انفجار این مقدار کم تفاوت، غیر قابل انتظار بود. بیشینه تغییر شکل نمونه های شماره 1 و شماره 2 به تر تیب 13/92 و 14/04 میلیمتر بوده است. این مقادیر بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و نشان دهنده حد نهایی شکل پذیری 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 می شود. به همین دلیل تکمیل فرایند تغییر شکل پلاستیک که با پالس های انعکاسی و فاز دوم بارگذاری مرتبط است به طور کامل انجام نمی شود.

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

جدول8 بیشینه تغییرشکل عددی با نتایج تئوری و تجربی

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



شکل 17 پارگی در محل اتصال ورق به پوسته

هیچگونه پارگی در محل اتصال ورق به پوسته ایجاد نشد و فرایند تغییر شکل طبق حالت I انجام پذیرفت. نمونههای شکل دهی شده شماره I و شماره 2 به ترتیب در شکلهای 18-الف و 18-ب نشان داده شده است. این موضوع نشان دهنده تأثیر مخرب ماخ استم است و لزوم تقویت محل اتصال ورق به پوسته در فرایند شکل دهی انفجاری آزاد این پوستهها را نشان می دهد. علاوه بر آن، مطابق یافتههای مرجع [7] در پوستههای کوتاه بسته تحت فشار داخلی، فرایند تغییر شکل با لغزش از تکیه گاهها شروع می شود. این موضوع موجب تشدید ایجاد حالت III تغییر شکل می شود.

مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی حالت II تغییر شکل، یعنی ایجاد پارگی طولی، با آزمایش های انجام شده اطلاعات مناسبی در خصوص این حالت واماندگی فراهم می کند. حالت II تغییر شکل در نمونه های شماره 1 و شماره 2 به ترتیب بر اثر انفجار 8 و 6 گرم ماده منفجره ایجاد شد. نتایج شبیه سازی حالت واماندگی نمونه ها همراه با توزیع کانتور شروع آسیب جانسون -کوک و نمونه های آزمایش شده در شکل 19 نشان داده شده است.

مشاهده می شود که نتایج به دست آمده از شبیه سازی و آزمایش ها از لحاظ ظاهری توافق خوبی دارند؛ اما دو تفاوت عمده در آن ها قابل مشاهده است: 1- تعداد پارگی های طولی ایجاد شده در شبیه سازی بیشتر از تعداد پارگی های ایجاد شده در آزمایش است. 2- حالت واماندگی به دست آمده از شبیه سازی نشان دهنده ایجاد همزمان حالت تغییر شکل II و III است اما در نمونه های آزمایش شده حالت تغییر شکل III دیده نمی شود.

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 ترکهای دیدی میشوند. این امر موجب رشد این ترکهای داندی میشوند. این امر موجب آن ایجاد میشود. این مرکز شده و از آنها خارج میشوند. این امر موجب رشد این ترکهای دیدی میشوند. این امر موجب آن ایجاد میشود. این ترکهای داندی میشود. این ترکها متمرکز شده و از آنها خارج میشوند. این امر موجب ترکهای جدید میشود؛ اما در شبیه سازی، به دلیل آن که فشار ایجاد شده بر اثر انفجار به عنوان شرط مرزی بر روی سطح داخلی پوسته اعمال شده است، این انفجار به عنوان شرط مرزی بر موی سطح داخلی پوسته اعمال شده است، قسمتهای دیگر کاهش نمی یابد. به همین دلیل تعداد پارگیهای ایجاد شده بیشتر است. همچنین خروج محصولات گازی موجب تغییرشکل پلاستیک بیشتر و باز شدن دهانه پارگیهای میشود. علاوه بر این در مدل سازی حالت واماندگی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز برای آلیاژ آلومینیوم واماندگی به دلیل در ستری راندی مان می می می می می می می می مود. عرف الیاز آلومینیوم الی می می مودن اطلاعات مورد نیاز برای آلیاژ آلومینیوم واماندگی به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات مورد نیاز برای آلیاژ آلومینیوم





شكل 18 نمونه هاى شكل دهى شده الف) نمونه شماره 1، ب) نمونه شماره 2





الف)





شکل19 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 شکل پذیر از جمله آلومینیوم، افزایش نرخ کرنش موجب افزایش تنش شکست ماده می گردد، صرفنظر از این اثر موجب ایجاد پارگیهای بیشتر شده است.

2- در آزمایش های انجام شده از دو پاس جوش برای اتصال ورق به پوسته استفاده شد. همان گونه که پیش از این بحث شد، این جوش موجب ایجاد یک تکیه گاه موضعی قوی در محل اتصال شده و از پارگی در این ناحیه جلوگیری می کند. در شبیه سازی ها این تکیه گاه مدل نشده است و پارگی كامل محيطي در محل اتصال اتفاق افتاده است. اين نتايج ضرورت وجود تکیه گاههای تقویت شده در محل اتصال پوسته به ورق در شکل دهی انفجاری

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 13

پوستههای استوانهایکوتاه را تأیید میکند.البته باید توجه داشت که صفحات فولادی با ایجاد نیروی محوری، به طور کلی موجب تقویت تکیه گاه می شوداما 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 تقويت شود.

6- نتيجه گيري

شبیهسازی عددی ایجاد انعکاس ماخ در شکل دهی 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 می توان 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 می گیرد، 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 یوسته مشاهده شد.

- در نمونههایی که به طور کامل شکلدهی شده بودند (حالت تغییرشکل I)، بیشینهی تغییرشکل 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، تأثير مخرب ماخ استم، تمركز تنش و لغزش برشي در تكيه گاهها علت ايجاد حالت تغییر شکل III، یعنی یارگی در محل اتصال تشخیص داده شد.

- حالت واماندگی به دست آمده از شبیه سازی نشان دهنده حالت تغییر شکل II و III بود اما در نمونه های آزمایش شده حالت تغییر شکل III دیده نشد. دلیل عدم مشاهده این حالت در آزمایشها، استفاده از دو پاس جوش برای اتصال پوسته به ورق های انتهایی است. همچنین نتایج حاصل شده، لزوم استفاده از تکیه گاههای تقویت شده در فرایند شکل دهی انفجاری پوستههای استوانهای کوتاه را تأیید می کند.

7- ليست علائم و نشانه ها

D	پارامتر آسيب
a	قطر استوانه (m)
е	انرژی ماده منفجره (kJ)
Ε	مدول یانگ (GPa)
Gic	نرخ رهایش انرژی در حالت کرنش صفحهای(ا)
Gc	نرخ رهایش انرژی در حالت تنش صفحهای(l)
I	ایمپالس (MPa.ms)
K	نسبت ظرفيت حرارتي
Kıc	چقرمگی شکست (MPa√m)
Ka	مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در حالت تنش
	صفحهای (MPa\m)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-15]

محمدوهاب موسوی و همکا*ر*ان

- [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*, 2nd 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*, 3rd 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, Ř. Zaera, J. Lo´ pez-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 evalution 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.

1 طول استوانه (m) Μ عدد ماخ Р فشار (Pa) Pa فشار اتمسفر (Pa) R فاصله از مرکز ماده منفجره (m) ta زمان رسیدن موج (ms) t زمان (ms) V (m³) حجم W وزن معادل TNT برای ماده منفجره (kg)

۲۰ ورن معادل ۱۹۹۲ برای ماده منفجر Z فاصله مقیاس شده (m/kg^{1/3})

علايم يونانى

زاویه انتقال (°)	αm
كرنش شكست	Ef
كرنش پلاستيك	\mathcal{E}_p
نرخ کرنش پلاستیک (1/s)	$\dot{\varepsilon}_p$
نرخ کرنش مرجع (1/s)	$\dot{\varepsilon_0}$
تنش سه محوری (MPa)	σ^{*}

8- مراجع

- 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 ofspherical 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.

بررسی عددی شکل گیریانعکاس ماخ در شکلدهی انفجاری آزاد پوستههای استوانهای بسته