



محاسبه توزیع فشار انفجار پیرامون اجسام سیلندری شکل با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی انفجار

سید حامد خلیل پور¹، علی اکبر آقا کوچک^{2*}، قاسم دهقانی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، a_gha@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 شهریور 1395

پذیرش: 23 آبان 1395

ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:

شبیه‌سازی انفجار

محیط اولرین

اجسام سیلندری شکل

مخازن تحت‌فشار

سیستم‌های لوله‌کشی

چکیده

انفجار یکی از مخاطرات جدی در صنایع پتروشیمی و سکوها استخراج نفت و گاز محسوب می‌گردد. مخازن تحت‌فشار در تأسیسات فوق به دلیل اینکه در اثر انفجار می‌توانند خسارات بسیار زیادی را به دیگر بخش‌ها وارد کنند، بسیار بااهمیت می‌باشند. در طراحی‌های صنعتی بار انفجار خارجی به‌صورت یک بار یکنواخت به یک وجه از مخازن تحت‌فشار اعمال می‌گردد. در این مطالعه تلاش می‌شود توزیع واقع بینانه‌تری مطابق با آنچه در آزمایشات به‌دست‌آمده، ارائه گردد. این مطالعه شامل بررسی صحت استفاده از قابلیت اولرین در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس جهت انجام تحلیل‌های کوپل نشده اولرین-لاگرانژین می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از محیط اولری در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس در نقاطی که اثر آشفتگی زیاد نیست، تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد اما در نقاطی که اثر آشفتگی و تشکیل گردابه‌ها افزایش می‌یابد، خطا در مدل عددی نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق نشان می‌دهد، روشی که به‌صورت معمول جهت اعمال بار انفجار به اجسام سیلندری شکل استفاده می‌شود، اختلاف زیادی با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی دارد. به همین منظور بر اساس نتایج مطالعات عددی روابطی برای محاسبه توزیع فشار برای قطرهای مختلف از اجسام سیلندری شکل در حالت قائم و افقی ارائه می‌گردد که می‌تواند در تحقیقات آتی و یا طراحی‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.

Determination of blast pressure distribution around cylindrical shape based on numerical simulation of explosion

Seyed Hamed Khalilpour¹, Ali Akbar Aghakouchak^{1*}, Ghasem Dehghani²

1-Department of Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Civil Engineering, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, a_gha@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 20 September 2016

Accepted 13 November 2016

Available Online 18 January 2017

Keywords:

Explosion simulation

Eulerian domain

cylindrical shape

pressure vessel

pipings system

ABSTRACT

Explosion is considered as the most hazardous event in petrochemical facilities and offshore structures. In these facilities, pressure vessels are very important because their explosion may result in damage to other modules. In practical design, external blast load is applied to one side of pressure vessels as uniform load. In this paper we try to propose more realistic distribution to confirm experimental results. This paper includes validation of Eulerian domain capability in finite element program ABAQUS to carry out uncoupled Eulerian Lagrangian analysis. The results show good agreement between Eulerian capability and experimental results in locations that do not have high turbulence effect, but in points where turbulence effects and vortexes are increased, error in numerical model is larger. Also, this paper shows that the method which is usually used to apply blast loads to cylindrical materials has a great error in comparison with numerical simulation and experimental results. Thus, in this paper a blast load distribution is presented which can be used in future research and industrial designs for vertical shape or horizontal shape of cylindrical materials with a variety of different diameters.

1- مقدمه

بسیار داغ انجام می‌شود. به دلیل سرعت بسیار زیاد واکنش (حدود یک‌صدم ثانیه) ترکیبات بلافاصله منبسط نمی‌شوند، بلکه برای کسری از ثانیه درون ظرف خود باقی می‌مانند؛ بنابراین به علت فضای بسیار کوچک و دمای بسیار بالا، فشار زیادی حاصل می‌شود. این فشار می‌تواند یک موج انفجار تولید کند

انفجار شیمیایی نتیجه یک واکنش شیمیایی است که در یک‌فاصله زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهد و با تولید مقدار زیادی حرارت و گاز همراه است. در یک واکنش شیمیایی، انتقال گرمایی سریع همراه با تشکیل گازها و بخارات

Please cite this article using:

S. H. Khalilpour, A. A. Aghakouchak, Gh. Dehghani, Determination of blast pressure distribution around cylindrical shape based on numerical simulation of explosion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 19-28, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌گردد، که توسط گازهای داغ، رانده‌شده و پشتیبانی می‌شود. جبهه شاک، که موج انفجار نامیده می‌شود، توسط افزایش تقریباً آبی از فشار محیط به حداکثر فشار برخوردی (p_{so}) مشخص می‌گردد. این افزایش فشار یا جبهه شاک، به‌طور شعاعی از نقطه انفجار با یک سرعت کاهش یابنده، حرکت می‌کند. با گسترش جبهه شاک به حجم‌های بزرگ‌تر در محیط انتشار، حداکثر فشار برخوردی در جبهه‌ها کاهش یافته و مدت تداوم فشار افزایش می‌یابد [6,5].

در هر نقطه دور از محل انفجار، تغییر زمان‌مند فشار مطابق با منحنی نشان داده‌شده در "شکل 2" می‌باشد. جبهه شاک به یک موقعیت معین در زمان t_a می‌رسد و بعد از افزایش یافتن فشار به مقدار حداکثر (p_{so})، فشار برخوردی در طول زمانی که، مدت تداوم فاز مثبت نامیده می‌شود، به مقدار فشار محیطی اتمسفری تنزل می‌یابد. این فاز مثبت توسط یک‌فاز منفی با مدت تداوم t_o که معمولاً خیلی طولانی‌تر از مدت تداوم فاز مثبت است، دنبال می‌شود. این فاز منفی با یک فشار منفی (کمتر از فشار اتمسفری محیطی) با یک مقدار بیشینه p_{so} که ناشی از برگشت جریان ذره‌ای است، مشخص می‌شود. در طراحی مهندسی، فاز منفی معمولاً اهمیت کمتری نسبت به فاز مثبت دارد. چگالی تکانش برخوردی موج انفجار، انتگرال سطح زیر منحنی فشار - زمان بوده و برای فاز مثبت با t_s^+ و برای فاز منفی با t_s^- نشان داده می‌شوند [7,5].

1-2- تی ان تی معادل

در خصوص اثرات انفجار عمده داده‌های ارائه‌شده در راهنماها و آیین‌نامه‌ها مربوط به فشارهای حاصل از انفجار ماده تی ان تی کروی بدون روکش است. این داده‌ها را می‌توان برای دیگر مواد مستعد انفجار، با برقراری ارتباط بین انرژی انفجار وزن مؤثر خرج این مواد با مقادیر نظیر حاصل از وزنی معادل با تی ان تی تعمیم داد. علاوه بر انرژی حاصله، عوامل دیگری ممکن است بر معادل مواد در قیاس با تی ان تی اثر بگذارند. این عوامل شامل شکل ماده (مسطح، مربع، گرد و غیره) تعداد مواد (مختلف) منفجره، محصورشدگی ماده منفجره (غلاف، محفظه دربرگیرنده و غیره) و محدوده فشار مدنظر (محدوده نزدیک، متوسط، یا دور) می‌باشند [8,5].

برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر انفجار، اثرات انرژی آزادشده حاصله از ماده منفجره با یک شکل خاص، نسبت به مقدار نظیر در تی ان تی با شکل مشابه، می‌تواند به‌صورت تابعی از حرارت انفجار مواد مختلف بیان گردد. جدول 1 و رابطه (1) نحوه تبدیل فوق را نشان می‌دهد.

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \quad (1)$$

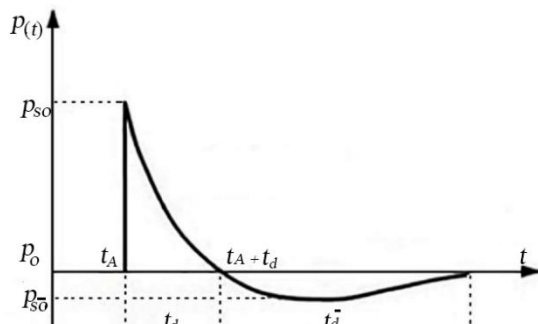


Fig.2 free-field pressure-time variation[5]

شکل 2 تغییرات فشار-زمان در میدان آزاد [5]

و سبب خسارت به اشیای اطراف شود [2,1]. انفجار ابر بخار¹ به معنای توده‌ای از مخلوط گازی در فضای اتمسفر است که تحت شرایط مشخصی منفجر می‌گردد [3].

از مهم‌ترین عواملی که بر روی شدت انفجار تأثیر می‌گذارد می‌توان به نوع ترکیب مخلوط سوخت-هوا، زمان اتفاق افتادن احتراق، شرایط مرزی و شرایط محیطی اشاره کرد. انفجار ابر بخار تفاوت‌هایی با انفجار مواد منفجره قوی² دارد.

در مخلوط‌های قابل ترکیب شکل‌گیری موج انفجار می‌تواند تحت دو مکانیزم صورت گیرد:

الف) دفلگريشن³: انتقال گرما از بخش منفجرشده به بخش سوخته نشده مخلوط باعث انتشار شعله می‌شود.

ب) دتونیشن⁴: اگر شعله توسط یک موج شاک به حرکت درآمده باشد که مخلوط گازی در مقابل خود را فشرده می‌کند و می‌سوزاند، می‌توان آن را یک انفجار ناگهانی یا دتونیشن نامید.

برخی ویژگی‌های موج انفجار ناشی از دو مکانیزم فوق در "شکل 1" نمایش داده‌شده است [4,2].

موج ناشی از دتونیشن شامل یک افزایش ناگهانی فشار از فشار هوای اتمسفر به یک فشار اوج⁵ می‌باشد و فشار هوا در یک مدت‌زمان اندک از فشار اوج به فشار اتمسفر باز می‌گردد. درحالی‌که موج انفجار ناشی از دفلگريشن شامل افزایش نسبتاً تدریجی فشار از فشار اتمسفر به فشار اوج می‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که دتونیشن موج انفجاری با بیشینه فشار بیشتر و مدت تداوم کمتری نسبت به دفلگريشن تولید می‌کند. پدیده دفلگريشن اگر در محیطی با فشار و انبساطگی بالا صورت گیرد، می‌تواند به پدیده دتونیشن تبدیل گردد. وقتی که یک موج انفجار به یک سطح برخورد می‌کند، منعکس می‌گردد. بزرگی موج منعکس‌شده بستگی به میزان حداکثر فشار و همچنین زاویه برخورد موج انفجار دارد. موج منعکس‌شده ناشی از مکانیزم دفلگريشن بستگی بیشتری به موج برخوردی و ابعاد سازه هدف دارد.

1-1- انفجار در هوا

رها شدن یک‌باره انرژی از یک فرآیند انفجار، ماده منفجره را به گازهای با فشار و دمای بسیار بالا تبدیل می‌کند. جبهه فشاری یک گاز با فشار بالا، به‌طور شعاعی در محیط اتمسفر به‌صورت یک موج شاک قوی منتشر

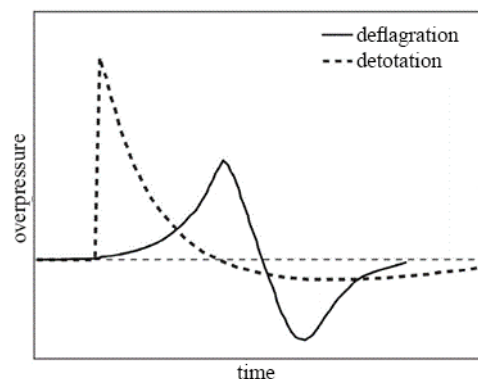


Fig.1 two mechanism for explosion [4]

شکل 1 دو مکانیزم انفجار [4]

¹ Vapour Cloud Explosion (VCE)

² high explosive (HE)

³ deflagration

⁴ detonation

⁵ peak pressure

جدول 1 ضرایب تبدیل انفجار [9]

نوع ماده منفجره	ضریب تی ان تی معادل Q_x/Q_{tnt}	انرژی مخصوص (Q_x (kJ/kg))
Compound b	1.148	5190
TNT	1	4520
C4	1.34	6057

پارامترهای موج شک از اهمیت خاصی برخوردار است. براد [10] روابط (2و3و4) را برای به دست آوردن فشار اوج ارائه کرد. R فاصله از ماده منفجره بر حسب متر و W وزن معادل تی ان تی بر حسب کیلوگرم می‌باشد.

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2)$$

$$P_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019, \text{bar} \quad \text{برای } 0.1 < P_s < 10 \quad (3)$$

$$P_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1, \text{bar} \quad \text{برای } P_s > 10 \quad (4)$$

افراد دیگری هم روابط متفاوتی را ارائه کرده‌اند از جمله میلس که رابطه (5) را برای فشار اوج ارائه کرده است. [11]

$$P_s = \frac{108}{Z} + \frac{114}{Z^2} + \frac{1772}{Z^3} - 0.019, \text{KPa} \quad (5)$$

همچنین سرعت حرکت جبهه شک (U_s) و حداکثر فشار دینامیکی (q_s) نیز توسط اسمیت بیان گردیده است (رابطه 6 و 7) [12].

$$U_s = a_0 \sqrt{\frac{6P_s + 7P_0}{7P_0}} \quad (6)$$

$$q_s = \frac{5P_s^2}{2(P_s + 7P_0)} \quad (7)$$

همچنین آیین‌نامه ای‌بی‌آی¹ رابطه (8) را جهت بدست آوردن مدت تداوم فشار انفجار ارائه کرده است [13].

$$t^+ = 0.084 + \frac{13000}{p} \quad (8)$$

1-3- انعکاس موج شک

در هنگام پیش‌بینی عملکرد سازه‌ای در اثر بارگذاری انفجار، نه تنها موج شک‌های تولیدشده در حین انفجار بایستی به‌عنوان یک نیروی ویژه در نظر گرفته شوند، بلکه امواج انعکاسی نیز می‌توانند موجب افزایش بسیار بیشتر فشار در یک نقطه شوند. در انفجار امکان رخ داد سه نوع انعکاس وجود دارد: انعکاس عمودی، انعکاس مایل و انعکاس ماک در انعکاس عمودی جبهه شک، زاویه برخورد یا انحراف از خط عمود بر سطح برابر صفر است. زوایای برخورد و انعکاس در "شکل 3" نشان داده شده است.

رانکین و هوگوینیوت روابط (9) و (10) را برای محاسبه فشار منعکس شده (P_r) از اجسام با زاویه برخورد صفر درجه و همچنین ضریب انعکاس (C_r) در حالت فوق ارائه کرده‌اند.

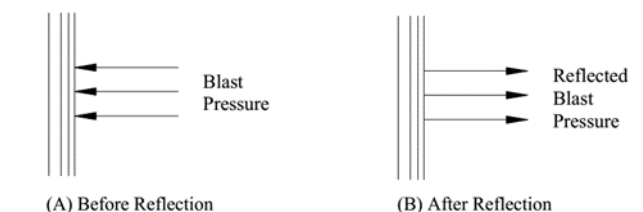


Fig.3 normal reflection [14]

شکل 3 انعکاس عمودی [14]

$$P_r = 2P_s \frac{4P_s + 7P_0}{P_s + 7P_0} \quad (9)$$

$$C_r = \frac{P_r}{P_s} \quad (10)$$

در انعکاس مایل امواج با زاویه به مرز برخورد کرده و با زاویه از آن دور می‌شوند، زاویه برخورد الزاماً با زاویه انعکاس برابر نیست. علاوه بر این در هنگام دور شدن امواج از نقطه برخورد، امواجی که بار اول به سمت سازه حرکت می‌کنند با این امواج برخورد می‌کنند. این امر موجب می‌شود که امواج مجدداً به سمت سازه حرکت کنند و برای بار دوم با سازه برخورد کنند. نوع آخر انعکاس که پیچیده‌ترین نوع انعکاس می‌باشد، تحت عنوان شکل‌گیری باریکه ضربه (ماخ) نامیده می‌شود، همان‌طور که در "شکل 4" مشاهده می‌شود این نوع انعکاس از این بابت که برخوردی با سطح ندارد، با دونوع انعکاس پیشین تفاوت دارد در عوض این موج از تداخل امواج برخورد و انعکاس شکل می‌گیرد. این تداخل نوع منحصربه‌فردی از موج تحت عنوان انعکاس ماک ایجاد می‌کند [15,16].

1-4- مروری بر مطالعات گذشته

در این بخش مرور محدودی بر تحقیقات گذشته در این زمینه صورت می‌گیرد. در سال 2015 یاسری [9] تحقیقاتی را در مورد توزیع بار انفجار پیرامون تانکرهای بزرگ ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی صورت داد.

یاسری [9] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی معادله‌ای را برای به دست آوردن نیروی ناشی از انفجار بر اجسام استوانه‌ای شکل ارائه کرد. این نتایج براساس سه سری آزمایش بوده‌اند. سازه هدف آزمایشات نیز تانکری تقریباً صلب با ارتفاع 2 متر و قطر 2.5 متر بوده است. فشارسنج‌هایی در دو ارتفاع 0.9 و 1.2 متر از زمین و در پیرامون سازه نیز در 19 نقطه (یعنی درمجموع 38 فشارسنج) قرار داده شده که فشار را با زاویه ده درجه از یکدیگر نسبت به مرکز سیلندر و در دو ارتفاع مختلف بر روی سیلندر اندازه‌گیری کرده‌اند. سپس نتایج دو ارتفاع در 3 سری آزمایش فوق میانگین‌گیری شده است. سپس منحنی از میان نتایج فوق عبور داده شده و معادله‌ای با ضرایب مشخص جهت استفاده مهندسی پیشنهاد داده است. "شکل 5" نمودار فشار-زمان ارائه شده توسط یاسری را بیان می‌کند. رابطه (11) با در نظر گرفتن ضرایب ارائه شده [9] نسبت بین حداکثر فشار منعکس شده در زاویه θ و حداکثر فشار منعکس شده در زاویه صفر درجه را ارائه می‌کند (P_1/P_r) همچنین شکل 6 نسبت P_1/P_r به دست آمده از رابطه (10) برای زاویه صفر تا 180 درجه (پشت سازه) را ارائه می‌کند.

$$\frac{P_1}{P_r} = \sum_{i=0}^6 c_i \cos i\theta \quad (11)$$

لوکا و چن [4] نیز در سال 2015 تحقیقاتی را پیرامون پاسخ سیلندر فولادی به بار انفجار، از طریق انجام کارهای آزمایشگاهی و عددی، صورت

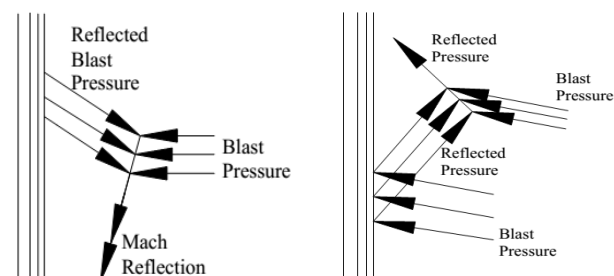


Fig.4 oblique reflection and mach steam function [14]

شکل 4 انعکاس مایل و جبهه ماک [14]

¹ American Petroleum Institute (API)

فشار ایستا بستگی دارد به ابعاد سازه و همچنین مکان وجه جلویی سازه که موج به آن برخورد می‌کند. ضریب درگ با تغییر شکل سازه تغییر می‌کند. در موارد متعدد، به میانگین ضریب درگ برای محاسبه نیروی مؤثر انفجار بسنده می‌شود. زمان افزایش فشار در سطوح پشتی سازه نیز بستگی به ابعاد و نکات دیگری راجع به شکل سازه دارد.

بنابراین به‌عنوان نوع آوری این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- 1- بررسی قابلیت محیط اویلرین در نرم‌افزار آباکوس جهت شبیه‌سازی انفجار دورا.
 - 2- بررسی قابلیت و مقایسه دقت شبیه‌سازی انفجار در نقاط دارا و فاقد اثر آشفتگی.
 - 3- ارائه فرمول توزیع بار انفجار پیرامون اجسام سیلندری شکل. همچنین روند به دست آوردن منحنی فشار زمان برای 10 حالت متفاوت از لحاظ قطر و افقی یا عمودی بودن جسم سیلندری شکل جهت استفاده در کارهای تحقیقاتی و یا صنعتی آتی.
- تا جایی که بررسی نویسندگان نشان می‌دهد، چنین تحلیلی تاکنون توسط محققان ارائه نشده است و این مقاله برای اولین بار این موضوع را مورد کاوش قرار می‌دهد.

ساختار ادامه مقاله به شرح زیر است: در بخش آتی شبیه‌سازی‌ها و اعتبار سنجی روش ارائه می‌گردد. در بخش سوم مقاله، نتایج به‌دست‌آمده از بخش دوم تحلیل می‌گردد و روند پیشنهادی برای به دست آوردن منحنی فشار-زمان برای طراحی اجسام سیلندری شکل در مقابل انفجار ارائه می‌گردد. در نهایت در بخش چهارم، نتایج مقاله تبیین می‌گردد و در بخش پنجم علائم و پارامترهای بکار رفته در مقاله معرفی می‌گردد.

2- شبیه‌سازی انفجار و صحت سنجی آن

2-1- ابزارهای شبیه‌سازی

تمرکز اصلی این مقاله مربوط به توسعه مدل اجزای محدود پیشرفته برای به دست آوردن توزیع بار انفجار پیرامون یک جسم سیلندری شکل مانند مخازن تحت‌فشار موجود در عرشه سکوها دریایی و یا مخازن نفت و گاز و همچنین سیستم‌های لوله‌کشی در تأسیسات پتروشیمی می‌باشد. قابلیت مدل‌سازی در حوزه اولرین که اخیراً به نرم‌افزار آباکوس اضافه گردیده، در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقات پیشین پیرامون مدل‌سازی انفجار از نرم‌افزارهای مانند ال اس داینا و اتو داین جهت مدل‌سازی انفجار استفاده گردیده که غالباً در محیط (اولرین-لاگرانژین انتخابی)¹ شبیه‌سازی انفجار صورت گرفته است؛ بنابراین از ویژگی‌های تحقیق حاضر مدل‌سازی هوا و همچنین شبیه‌سازی انتشار موج انفجار در محیط اولرین در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس می‌باشد. برخلاف کدهای لاگرانژی، کدهای اولری با فرض کردن چهارچوب مرجع اولری اقدام به حل معادلات اولری می‌نمایند که در این حالت المان بندی‌های محاسبه‌شده در هر مرحله در جای خود ثابت می‌باشند و مواد یا ماده‌های جداگانه اختصاص داده‌شده به مجموعه المان‌ها در آن‌ها حرکت می‌کنند.

2-2- ساخت مدل عددی و بررسی صحت نتایج

مدل‌سازی‌های زیادی صورت گرفت تا اطمینان حاصل گردد که مدل شبیه‌سازی‌شده گسترش موج انفجار در محیط اولری تطبیق خوبی با واقعیت داشته باشد. برای این منظور بررسی مطابقت ضریب انعکاس عمودی موج

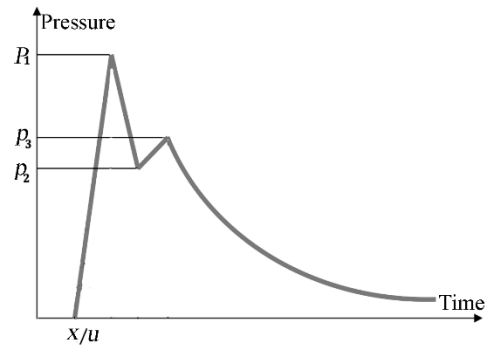


Fig.5 the pressure-time curve presented in [9]

شکل 5 نمودار فشار-زمان ارائه شده در [9]

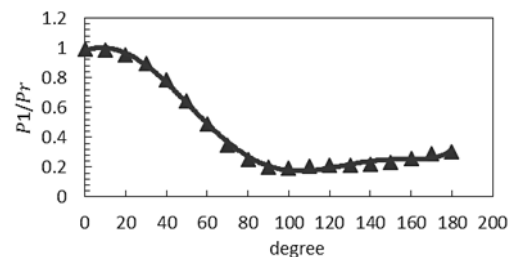


Fig.6 the suggested curve by Yasserli for P_1/P_r from zero to 180 degree [9]

شکل 6 نمودار ارائه‌شده توسط یاسری برای نسبت P_1/P_r از زاویه صفر تا 180 درجه [9]

داده‌اند. آن‌ها در کار آزمایشگاهی خود فشار را در اطراف سیلندر اندازه‌گیری نکرده‌اند بلکه با مدل‌سازی عددی و مشاهده نزدیکی تغییر شکل‌های سیلندر بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی به صحت نتایج خود پی برده‌اند. همچنین آن‌ها در مقاله خود فشار به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی را در پنج زاویه مختلف پیرامون سیلندر گزارش کرده‌اند. سیلندر مورد آزمایش لوکا و چن [4] در ابعادی با ارتفاع 0.905 و قطر 0.57 مورد بررسی قرار گرفته است.

1-5- فشار انفجار در اطراف اجسام سیلندری شکل

انواع المان‌های سازه‌ای را از نظر تأثیرپذیری از بار انفجار می‌توان به دودسته تقسیم کرد: نوع متأثر از اثر نیروی تفرق و نوع متأثر از اثر نیروی درگ آن دسته از سازه‌هایی که از نوع متأثر از اثر تفرق هستند بیش از همه به حداکثر فشار اوج ناشی از موج شاک حساسیت دارند. برای مثال تانکرهای بزرگ ذخیره‌سازی نفت و گاز؛ اما اگر در زمان وقوع انفجار و رسیدن موج انفجار به سازه، فشار وارد به پشت سازه به‌سرعت برابر با فشار در جهت روبرو گردد (به دلیل ابعاد اندک سازه) نیروی تفرق تنها برای مدت‌زمان اندکی به سازه اعمال می‌گردد پس بنابراین پاسخ سازه‌های فوق بیشتر بستگی دارد به فشار دینامیکی (یا نیروی درگ) ناشی از باد انفجار. منحنی فشار-زمان ناشی از انفجار دور از منبع معمولاً با منحنی مثلثی تعریف می‌گردد. در حالتی که معمولاً افزایش و کاهش یکسانی را برای آن در نظر می‌گیرند [9].

این بخش روشی را ارائه می‌کند که بر مبنای آن می‌توان بار انفجار وارد بر اجسام سیلندری شکل را در زمانی که جهت اعمال بار انفجار به‌صورت نرمال بر روی محور سیلندر می‌باشد، به دست آورد. نسبت بین فشار منعکس‌شده و فشار برخوردی موج انفجار بستگی دارد به زاویه‌ای که موج انفجار به جسم برخورد می‌کند. برای یک سطح منحنی، انعکاس می‌تواند بین هر دو نقطه متفاوت باشد. همچنین زمان کاهش فشار از فشار منعکس‌شده به

¹ Arbitrary Lagrangian Eulerian(ALE)

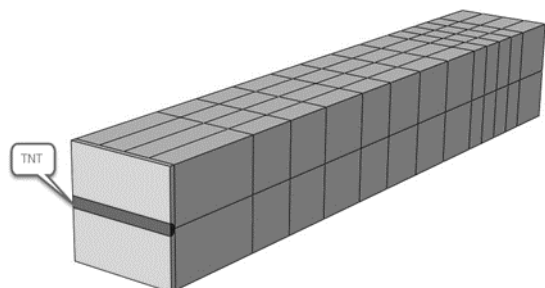


Fig.7 air and TNT simulation for validation of eulerian blast wave

شکل 7 مدل هوا و ماده منفجره جهت صحت سنجی موج انفجار در محیط اولرین

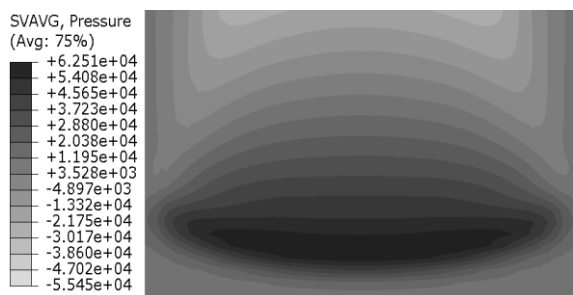


Fig.8 incident blast wave (Pa)

شکل 8 موج انفجار برخوردی (Pa)

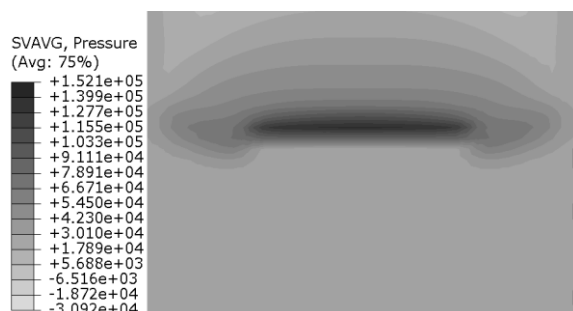


Fig.9 normal reflection of blast wave of rigid plate (Pa)

شکل 9 موج عمودی منعکس‌شده از صفحه صلب (Pa)

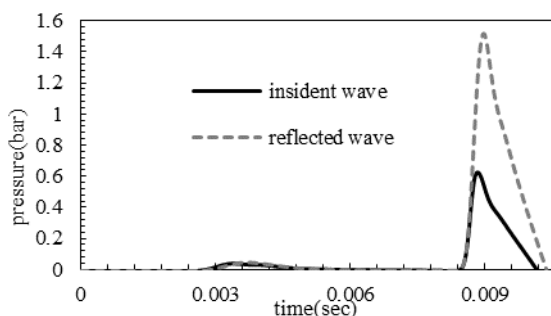


Fig.10 reflected and incident pressure-time curve

شکل 10 منحنی فشار-زمان موج برخوردی و موج منعکس شده

2-3- حساسیت نسبت به ابعاد مش

به دلیل وجود تعداد بسیار بالای المان‌ها در مدل‌های اولرین، نقش پیدا کردن ابعاد مناسب المان جهت مدل‌سازی سه‌بعدی کار بسیار بااهمیتی می‌باشد. در این تحقیق برای یافتن ابعاد مناسب مش، حداکثر سرعت جابجایی هوا در فاصله حدوداً 1.2 متری از ماده منفجره و در سه نقطه در یک

انفجار از یک صفحه صلب با نتایج آزمایشگاهی و فرمول‌های تحلیلی مدنظر قرار گرفت. هوا در ابعاد $10\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و ماده منفجره به شکل استوانه افقی به قطر 0.2m در ارتفاع 1m از کف قرار داده شد (شکل 7). برای شبیه‌سازی هوا از معادله حالت گاز کامل¹ و برای شبیه‌سازی ماده منفجره از معادله حالت جی‌دبلیوال² استفاده شده است. اعداد مشخص کننده ویژگی‌های ماده منفجره و هوا در مراجع متعدد ذکر گردیده است. جدول 2 مقادیر در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی مواد فوق را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی در شش وجه مکعب مستطیل هوا به صورت شرایط مرزی اولری³ و بدون انعکاس در نظر گرفته شده است. با این هدف که موج منتشره پس از برخورد با دیواره‌ها منعکس نگردد. صفحه صلب در ابعاد $1\text{m} \times 2\text{m} \times 0.001\text{m}$ در فواصل 8 و 10 متری از ماده منفجره در نظر گرفته شده است. در مجموع چهار شبیه‌سازی صورت گرفته است که دو مورد مربوط به دست آوردن فشار منعکس‌شده (با در نظر گرفتن صفحه صلب) و دو مورد هم مربوط به دست آوردن فشار برخوردی (بدون در نظر گرفتن صفحه صلب) می‌باشد. "شکل 8" موج برخوردی و "شکل 9" موج منعکس شده را در حالتی که صفحه صلب در فاصله 8 متری از ماده منفجره قرار گرفته است را نشان می‌دهد همچنین منحنی فشار زمان به دست آمده مربوط به موج برخوردی و موج منعکس‌شده در نقطه‌ای در میانه صفحه صلب برای شرایطی که صفحه صلب در فاصله 8 متری از منبع انفجار قرار گرفته در "شکل 10" نشان داده شده است.

سپس ضریب انعکاس (نسبت فشار منعکس‌شده به فشار برخوردی) به دست آمده از شبیه‌سازی عددی فوق با ضریب انعکاس به دست آمده از روابط تئوری رانکین و هوگیون (رابطه 9 و 10) و همچنین داده‌های ارائه شده در آیین‌نامه یوآسی⁴ [5] که حاصل از نتایج آزمایشگاهی متعدد می‌باشد، مقایسه گردیده است. نتایج مقایسه فوق در جدول 3 ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص می‌باشد، ضریب انعکاس مستقیم تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و داده‌های تحلیلی دارد و این موضوع صحت موج انفجار مدل‌سازی شده را می‌رساند.

جدول 2 مشخصات مواد

Table 2 material properties

ماده	نوع	مشخصات	میزان	واحد
چگالی	چگالی		1.293	kg/m^3
معادله حالت	ثابت گاز		287	J/kgK
هوا (گاز کامل)	فشار محیطی		101325	N/m^2
دمای مخصوص	دمای مخصوص		717.6	J/kgK
وسکوزیته	ویسکوزیته		6.924×10^{-6}	kg/sm
چگالی	چگالی		1630	kg/m^3
سرعت موج انفجار	سرعت موج انفجار		6930	m/s
توان تی	A		373770	mPa
معادله حالت (جی‌دبلیوال)	B		3747.1	mPa
	w		0.35	-
	R_1		4.15	-
	R_2		0.9	-
انرژی مخصوص	انرژی مخصوص		3860	kJ/kg

¹ Ideal gas

² JWL (Jones-Wilkins-Lee)

³ Eulerian boundary condition

⁴ UFC

جدول 3 صحت سنجی انعکاس عمودی

Table 3 validation for normal reflection

خطا (%)	C_r -rankine	C_r -UFC	C_r - numerical	P_r numerical -bar	P_s numerical-bar	فاصله از ماده منفجره (متر)
2.4	2.49	2.49	2.43	1.52	0.625	8
1.56	2.19	2.18	2.1	0.51	0.24	10

3- تحلیل نتایج

در "شکل 14" الگوی جریان در اطراف یک سیلندر نشان داده شده است. انتقال از جریان آرام به جریان آشفته بستگی زیادی به عدد رینولدز دارد و در بعضی مواقع جریان به صورت کاملاً آشفته درمی‌آید. ضرایب درگ و لیفت نیز به مقدار زیادی بستگی به این انتقال (از آرام به آشفته) دارند. "شکل 14" نشان می‌دهد که توزیع فشار در اطراف سیلندر یکنواخت نیست؛ بنابراین اعمال یکنواخت بار انفجار به سطح رویی سیلندر پیش‌بینی صحیحی از نوع خرابی ارائه نمی‌کند.

همان‌طور که در "شکل 15" مشخص است تا حدود زاویه 100 درجه، نتایج مدل‌سازی عددی تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایش صورت گرفته توسط یاسری [9] دارد. اما از 100 درجه تا 180 درجه (پشت سازه)، اختلاف‌ها افزایش می‌یابد. در حقیقت به این دلیل که روش عددی در محیط اولرین (مورد استفاده در تحقیق حاضر) یک معادله ساده‌شده نویر استوکس¹ را حل می‌کند [2] و اثر گردابه‌های ایجادشده در کناره‌ها و پشت سازه را نمی‌بیند، می‌توان گفت فشاری که در واقعیت و آزمایش در پشت سازه ایجاد می‌شود را نمی‌تواند دقیقاً پیش‌بینی کند و در واقع یکی از ضعف‌های بسیار مهم فضا‌های اولرین در نرم‌افزار آباکوس می‌تواند همین در نظر نگرفتن اثر آشفتگی ایجادشده و همچنین تشکیل گردابه‌ها باشد. دلیل اینکه فشار در پشت سازه در مدل عددی بسیار کم‌تر از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است می‌تواند این باشد که تشکیل گردابه‌ها باعث می‌شود که موج بریده‌شده توسط سیلندر (مطابق "شکل 16 ج") زودتر به پشت سازه برسد و در نتیجه موج با فشار بیشتری در آزمایش نسبت به کار عددی به پشت سازه منتقل گردد.

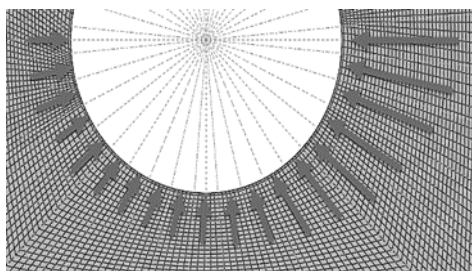


Fig.13 the 19 reference nodes for reflected pressures

شکل 13 قرائت فشار در 19 نقطه

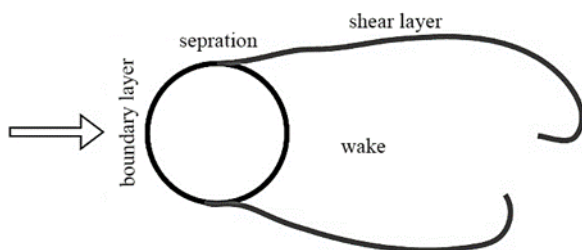


Fig.14 flow field around cylindrical cylinder

شکل 14 الگوی جریان در اطراف یک سیلندر

خط به فاصله 0.1 متر از یکدیگر در یک سناریو انفجار مشخص در ابعاد مش مختلف محاسبه گردیده است. همچنین حداکثر فشار رخ داده در یک نقطه یک المان و به فاصله 1.4 از ماده منفجره به عنوان معیاری دیگر برای بررسی ابعاد مناسب المان‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. همان‌طور که در "شکل 11" مشخص است ابعاد مش دو تا سه سانتی‌متر نتایج بسیار خوبی را ارائه می‌کند. در تحقیق حاضر در نقاطی که قصد قرائت فشار وجود دارد به جهت دقت در قرائت فشار منعکس‌شده از مش دو سانتی‌متر و برای مناطق دیگر از ابعاد بزرگ‌تر استفاده شده است.

همچنین المان‌های به کاررفته از نوع اولرین با نام EC3D8R می‌باشند.

2-4- مدل عددی با در نظر گرفتن جسم سیلندری شکل

مدل هوا در محیط اولری در نرم‌افزار آباکوس و با ابعاد $2m \times 10m \times 10m$ مدل‌سازی گردید. مطابق با تحقیقات یاسری [9] مدل جسم سیلندری شکل به قطر دو و نیم متر و ارتفاع دو متر در نظر گرفته شد (شکل 12) و حداکثر فشارهای منعکس‌شده در ارتفاع 0.9 و 1.2 متر از کف (مطابق با داده‌برداری یاسری [9]) در نوزده نقطه (شکل 13) قرائت گردید و میانگین‌گیری صورت گرفت و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی یاسری [9] مقایسه گردید. ماده منفجره نیز به صورت استوانه‌ای شکل به قطر 10cm و طول 1.2m بر روی کف تعریف شده است. برای مقایسه نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی از نسبت موج منعکس‌شده در هر نقطه (P_1) به موج منعکس‌شده در زاویه صفر درجه (P_r) استفاده گردیده است.

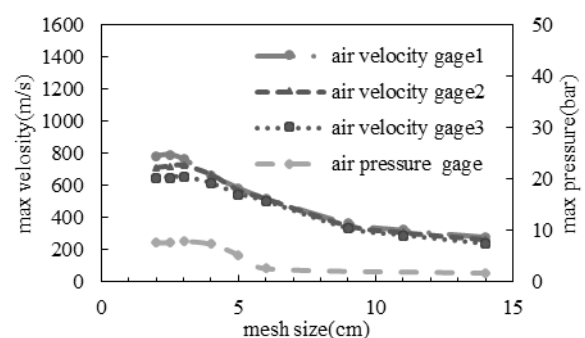


Fig.11 mesh convergence study

شکل 11 مطالعه همگرایی پاسخ‌ها نسبت به ابعاد مش

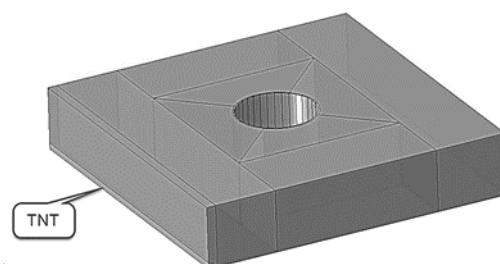


Fig.12 3D model of vertical circular cylinder(diameter=2.5m)

شکل 12 مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن سیلندر قائم به قطر 2.5 متر

¹ navier stokes

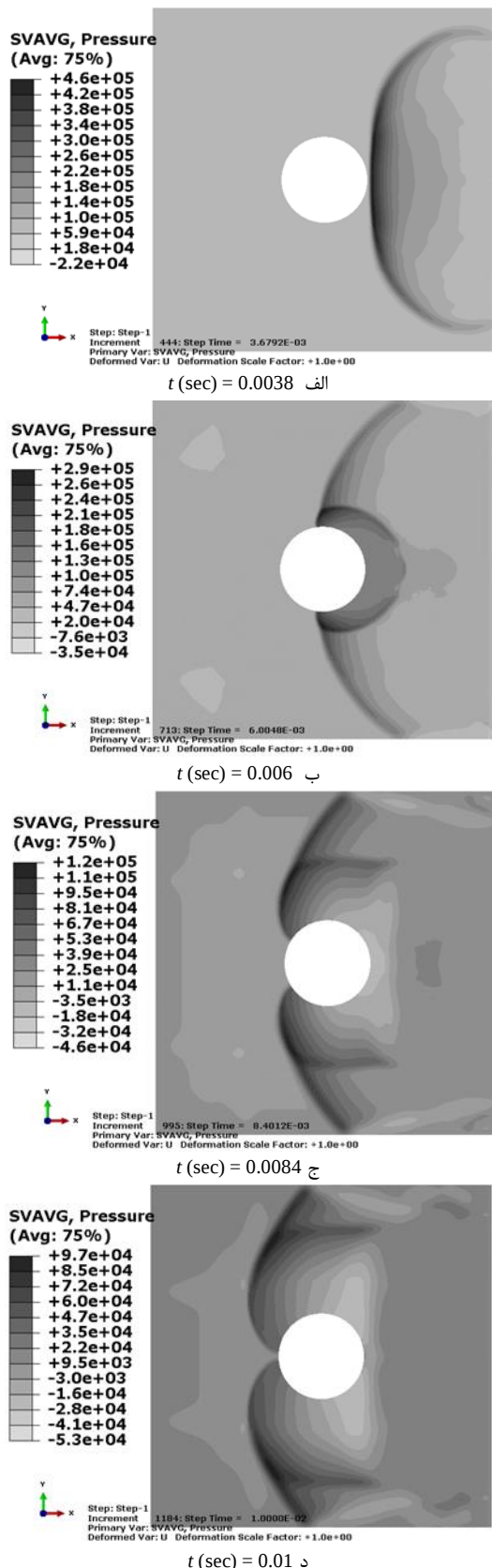


Fig.16 expansion of blast wave around circular cylinder (Pa)

شکل 16 گسترش موج انفجار در اطراف محفظه سیلندری شکل (Pa)

در رابطه (12) متغیر i به جملات سری (هفت جمله) مربوط می‌باشد و c_i یک ثابت است که سهم هر کدام از جملات سری فوق را نمایندگی می‌کند.

البته توجه به این امر ضروری است که با فرض پذیرش بالا بودن درصد اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در نقاط پشت مانع سیلندری شکل، به دلیل از بین رفتن اثر انعکاس در نقاط فوق، بزرگی فشار وارده نسبت به فشار وارد بر نقاط روبروی محل انفجار اندک بوده و در مجموع، اختلاف فوق تأثیر زیادی بر روی نیروی کلی وارد بر جسم سیلندری شکل ندارد.

1-3- مقایسه توزیع در قطرهای مختلف برای اجسام سیلندری قائم

در بررسی دیگر، با تغییر قطر جسم سیلندری شکل در قطرهای 0.5، 1، 1.5، 2 و 2.5 متر نیز شبیه‌سازی انفجار صورت گرفت و فشار پیرامون جسم سیلندری شکل قائم در میانه ارتفاع جسم و در دو فاصله 0.9 و 1.2 از کف قرائت گردید و فشار در دو ارتفاع فوق میانگیری شد. مطابق با "شکل 17" مشاهده شد که هرچه قطر جسم سیلندری شکل کاهش می‌یابد فشارها در نقاط مختلف پیرامون سازه به فشار P_r نزدیک‌تر می‌گردند و در حقیقت کاهش اثر انعکاس پیرامون جسم سیلندری شکل کم‌تر می‌شود و در قطرهای پایین می‌توان فشار یکنواختی را برای سطح روبروی جسم سیلندری شکل در نظر گرفت (شکل 17). در واقع می‌توان گفت که فرض در نظر گرفتن فشار یکنواخت پیرامون اجسام سیلندری شکل صرفاً در ابعاد بسیار کوچک قابل پذیرش است.

2-3- مقایسه توزیع در قطرهای مختلف برای اجسام سیلندری افقی

در بررسی دیگر به بررسی اثر انفجار بر اجسام سیلندری افقی پرداخته شد. در این بررسی اثر فاصله از زمین در نظر گرفته نشده است (شکل 18 و 19). با تغییر قطر جسم سیلندری شکل در قطرهای 0.5، 1، 1.5، 2 و 2.5 متر نیز شبیه‌سازی انفجار صورت گرفت و مشاهده شد (شکل 20) که مانند بررسی اجسام سیلندری قائم که هرچه قطر کاهش می‌یابد فشارها در نقاط مختلف پیرامون سازه به فشار P_r نزدیک‌تر می‌گردند و در حقیقت کاهش اثر انعکاس کم‌تر می‌شود؛ و در قطرهای پایین می‌توان فشار یکنواختی را برای سطح روبروی جسم سیلندری شکل در نظر گرفت.

3-3- برازش منحنی از نتایج عددی

مجموعه‌ای از منحنی‌های کسینوسی می‌توانند توزیع فشار پیرامونی اجسام سیلندری را نمایندگی کنند، به همین دلیل اغلب روابط ارائه‌شده جهت به دست آوردن توزیع فشار در اطراف اجسام سیلندری شکل از معادلات فوریه کسینوسی استفاده کرده‌اند. معادله منحنی برازش داده‌شده می‌تواند شکل رابطه (12) را داشته باشد:

$$\frac{P_1}{P_r} = \sum_{i=0}^6 c_i \cos i\theta = c_0 \cos 0 + c_1 \cos \theta + c_2 \cos 2\theta + c_3 \cos 3\theta + c_4 \cos 4\theta + c_5 \cos 5\theta + c_6 \cos 6\theta \quad (12)$$

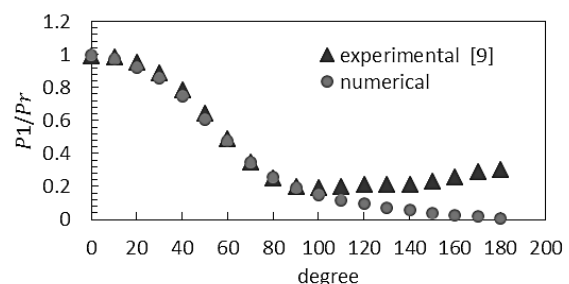


Fig.15 comparison of current numerical result with experimental result in [9]

شکل 15 مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی در [9]

در "شکل‌های 21 و 22" منحنی‌های برازش داده‌شده به همراه داده‌های عددی نمایش داده‌شده است. نقاطی که در این شکل‌ها نمایش داده‌شده مربوط به داده‌های عددی است و خط رسم شده منحنی برازش داده‌شده با استفاده از فوریه کوسینوسی می‌باشد.

3-4 روند محاسبه منحنی فشار-زمان

در این بخش فلوجارتی جهت محاسبه منحنی فشار-زمان اعمالی به جسم

جدول 4 ضرایب منحنی برازش داده‌شده از نتایج عددی برای جسم سیلندری شکل

قائم

Table 3 parameters of fitted curves for numerical results of vertical circular cylinder simulation

قطر 2.5	قطر 2	قطر 1.5	قطر 1	قطر 0.5	c_i
0.3589	0.3797	0.4214	0.4469	0.502	c_0
0.4605	0.4508	0.4483	0.4294	0.3833	c_1
0.157	0.1491	0.1175	0.1023	0.0711	c_2
0.0367	0.0296	0.0136	0.0186	0.0341	c_3
-0.0126	-0.0094	-0.0056	0.0014	0.0071	c_4
-0.0085	-0.0066	0.0004	0.002	0.0014	c_5
-0.0022	-0.0036	-0.0025	-0.0057	-0.0035	c_6

جدول 5 ضرایب منحنی برازش داده‌شده از نتایج عددی برای جسم سیلندری شکل

افقی

Table 4 parameters of the fitted curves for numerical result of horizontal circular cylinder simulation

قطر 2.5	قطر 2	قطر 1.5	قطر 1	قطر 0.5	c_i
0.4506	0.2883	0.3194	0.3938	0.4378	c_0
0.3860	0.40973	0.4289	0.4370	0.4305	c_1
0.0924	0.1996	0.1737	0.1291	0.098	c_2
0.0441	0.0859	0.0679	0.0302	0.0226	c_3
0.012	0.024	0.0125	0.0089	0.0116	c_4
0.004	0.0035	0.0031	0.011	0.0037	c_5
-0.006	-0.0079	-0.0024	0.0025	-0.007	c_6

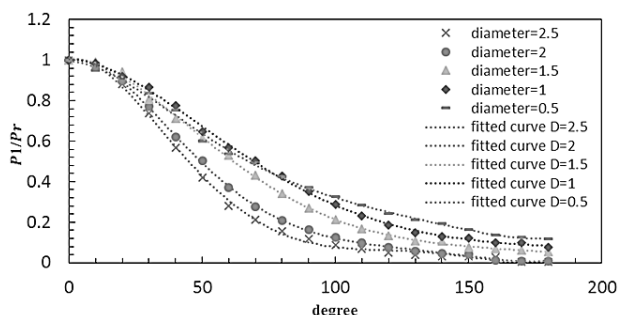


Fig.21 the fitted curves on numerical results of horizontal circular cylinder simulation

شکل 21 منحنی‌های برازش داده‌شده بر نتایج عددی مربوط به سیلندر افقی

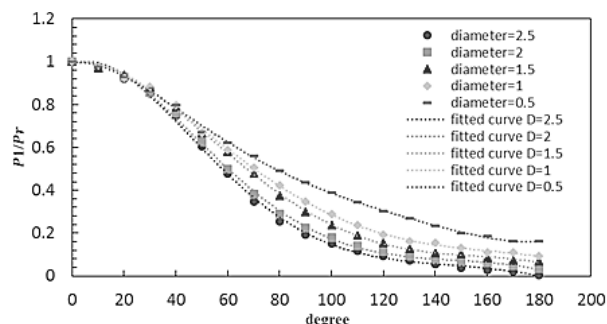


Fig.22 the fitted curves on numerical results of vertical circular cylinder simulation

شکل 22 منحنی‌های برازش داده‌شده بر نتایج عددی مربوط به سیلندر قائم

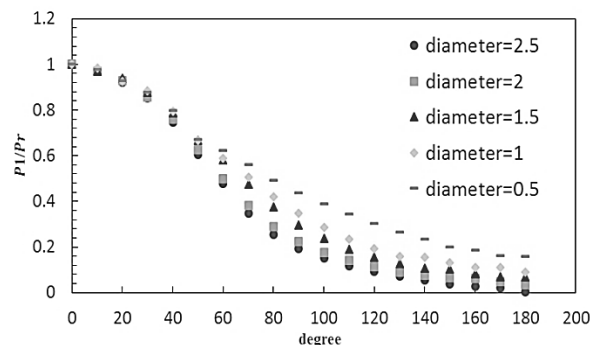


Fig.17 comparison among distribution of peak pressure in simulated diameters of vertical circular cylinder

شکل 17 مقایسه توزیع حداکثر فشار پیرامون سیلندر قائم در ابعاد مختلف

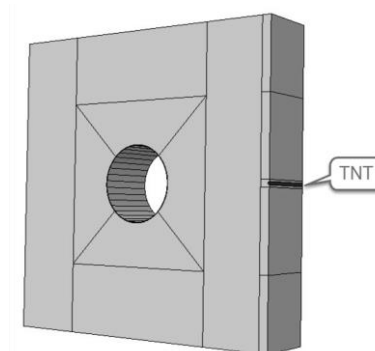


Fig.18 3D model of horizontal circular cylinder (diameter=2.5m)

شکل 18 مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن سیلندر افقی به قطر 2.5 متر

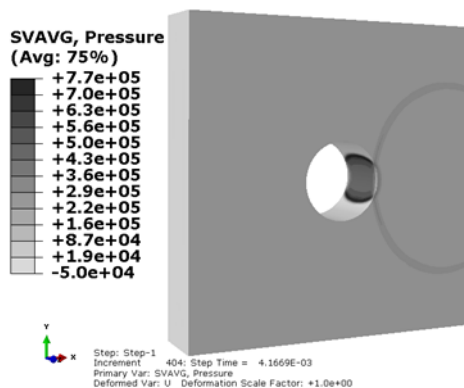


Fig.19 expansion of blast wave around horizontal circular cylinder (Pa)

شکل 19 گسترش موج انفجار پیرامون سیلندر افقی (Pa)

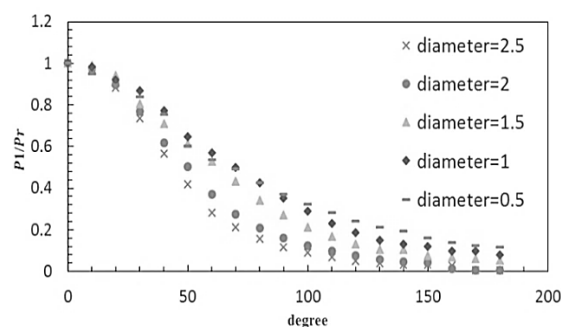


Fig.20 comparison among distribution of peak pressure in simulated diameters of horizontal circular cylinder

شکل 20 مقایسه توزیع حداکثر فشار پیرامون سیلندر افقی در ابعاد مختلف

جداول 4 و 5 اندازه c_i مربوط به منحنی‌های برازش داده‌شده را ارائه می‌نماید.

خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت اما در نقاطی که اثر آشفتنگی و تشکیل گردابه‌ها رخ می‌دهد، خطا در مدل عددی افزایش می‌یابد و این موضوع می‌تواند به دلیل استفاده محیط اولری در نرم‌افزار آباکوس از معادله ساده‌شده نویر استوکس باشد [4]. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق نشان داد، روشی که به‌صورت معمول در تحقیقات جهت اعمال بار انفجار به اجسام سیلندری شکل استفاده می‌شود (اعمال بار یکنواخت به سطح جلویی جسم سیلندری شکل)، اختلاف زیادی با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر داشت، به همین منظور بر مبنای شبیه‌سازی‌های عددی صورت گرفته روابطی جهت اعمال دقیق‌تر بار انفجار بر اجسام فوق ارائه گردید که می‌تواند در تحقیقات و یا طراحی‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. در بررسی بر روی ابعاد جسم سیلندری شکل، مشخص گردید که هرچه قطر سیلندر کاهش می‌یابد، نسبت فشار منعکس‌شده پیرامون سطح منحنی (P_1) به فشار منعکس‌شده در نقطه با زاویه صفر (P_r)، به عدد یک نزدیک‌تر می‌گردد. این نتیجه نشان می‌دهد در قطرهای بسیار کم تقریباً فشار منعکس‌شده در وجه جلویی سیلندر در زوایای مختلف، بزرگی یکسانی خواهند داشت.

5- فهرست علائم

C_r	ضریب انعکاس
H_{EXP}^d	دمای انفجار ماده منفجره مورد بررسی
H_{TNT}^d	دمای انفجار تی‌ان‌تی
R	فاصله از ماده منفجره
P_0	فشار محیطی هوا
P_r	حداکثر فشار منعکس‌شده
P_s	حداکثر فشار برخوردی
W_E	وزن مؤثر ماده منفجره (kg)
W_{EXP}	وزن ماده منفجره مورد بررسی

6- مراجع

- [1] P. S. Bulson, *Explosive loading of engineering structures*, pp. 30-100, London: Taylor & Francis e-library, 2002.
- [2] A. Chen, L. A. Louca, A. Y. Elghazouli, Blast assessment of steel switch boxes under detonation loading scenarios, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 78, No. 2, pp. 51-63, 2015.
- [3] A. Chen, *Structural response to vapour cloud explosions*, Doctor of Philosophy Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, pp. 31-150, 2012.
- [4] A. Chen, L. A. Louca, A. Y. Elghazouli, Behaviour of cylindrical steel drums under blast loading conditions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 88, No. 5, pp. 39-53, 2016.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers, *UFC3-340-02: Structure to Resist The Effects of Accidental Explosions*, pp. 30-150, New York: Department of Defense, 2008.
- [6] M. V. Mousavi, J. Zamani, S. M. R. Khalili, Numerical investigation of formation of Mach reflection in explosive free forming of confined cylindrical shells, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 131-142, 2015. (in Persian)
- [7] M. Goudarzi, J. Zamani, Experimental and numerical investigation of the maximum deflection of circular aluminum plate subjected to free air explosion, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 219-226, 2015. (in Persian)
- [8] V. M. Dehabadi, J. Z. Ashani, Study of various clamped isotropic square plates simulating methods and compare with experimental results under explosion loads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 315-322, 2015. (in Persian)
- [9] S. Yasseri, blast pressure distribution around large storage tanks, *Fabig Newsletter*, Vol. 30, No. 67, 2015.
- [10] H. L. Brode, Numerical solutions of spherical blast waves, *Journal of Applied physics*, Vol. 26, No. 6, pp. 766-775, 1955.
- [11] C. Mills, The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects, *Proceeding of the 1st international Conference on Concrete for Hazard Protection*, Edinburgh, pp. 61-73, 1987.

سیلندری شکل بر اساس داده‌های این تحقیق ارائه می‌گردد (شکل 23). در فلوچارت فوق با در نظر گرفتن حداکثر فشار برخوردی بر اساس تحلیل خطرهای صورت گرفته در مورد اجسام سیلندری شکل قائم فشار در ارتفاع به‌صورت یکنواخت فرض می‌گردد. در مورد اجسام سیلندری شکل افقی فشار در عرض یکنواخت فرض می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

در انفجارهای رخ داده در تأسیسات نفت، گاز و پتروشیمی، نقش مخازن تحت‌فشار و سیستم‌های لوله‌کشی به‌عنوان منبعی برای تولید انفجارهای متعدد و به وجود آمدن اثر دومینو، بسیار بااهمیت و غیرقابل‌اغماض می‌باشد. به دست آوردن توزیع مناسبی از بار انفجار خارجی بر روی مخازن فوق جهت استفاده در مسائل تحقیقاتی و طراحی‌های صنعتی امری بسیار ضروری تشخیص داده‌شده است. شکل هندسی المان‌های مکانیکی فوق ضرورت تحقیق بیشتر پیرامون اندرکنش اجسام سیلندری شکل با موج انفجار را اثبات می‌کند.

انفجار به مفهوم تبدیل ماده‌ای جامد با چگالی بالا به ماده‌ای با چگالی اندک می‌باشد. در نتیجه تغییر بسیار سریع در حجم ماده منفجره رخ می‌دهد. تغییر حجم فوق باعث رانده شدن هوای پیرامونی گردیده و در نتیجه موج انفجار گسترش می‌یابد. غالب روش‌های عددی از همین مفهوم برای شبیه‌سازی انفجار استفاده می‌کنند.

بررسی صحت و کفایت استفاده از یک روش اجزای محدود پیشرفته (از طریق مقایسه با نتایج آزمایشگاهی) جهت شبیه‌سازی انفجار از موضوعات مهم مورد بررسی در تحقیق حاضر بود و در ادامه مطالعه پارامتریک بر روی ابعاد مخازن تحت‌فشار متداول در صنعت و همچنین افقی یا قائم بودن آن‌ها صورت گرفته است. در انتها نیز روابطی جهت محاسبه منحنی فشار-زمان وارد بر پیرامون اجسام سیلندری شکل ارائه گردیده است.

نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان داد که استفاده از محیط اولری در نرم‌افزار اجزا محدود در نقاطی که آشفتنگی رخ نمی‌دهد تطبیق بسیار

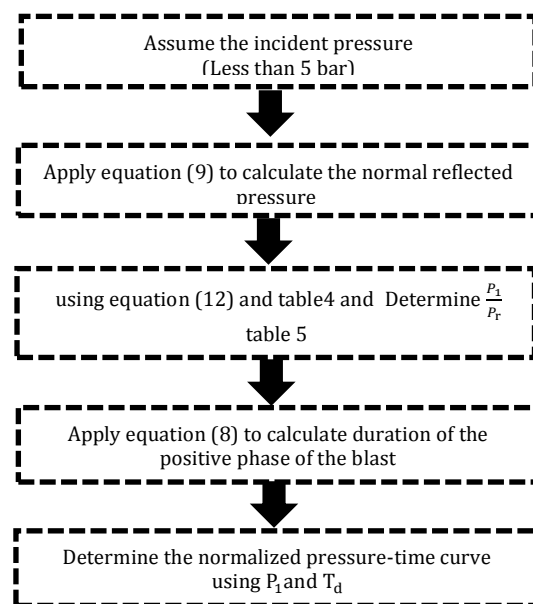


Fig.23 the proposed flowchart to obtain pressure-time curve in design of circular cylinder

شکل 23 فلوچارت بدست آوردن منحنی فشار-زمان برای طراحی اجسام سیلندری شکل

- Loading, Master Thesis, University of Delaware, pp. 40-150, 2007.
- [15] W.L. Bounds, *Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*, pp. 40-150, New York: ASCE Publications, 2010.
- [16] A. Van Netten, J. Dewey, A study of blast wave loading on cantilevers, *Shock Waves*, Vol. 7, No. 3, pp. 175-190, 1997.
- [12] G. Mays, *Blast Effects on Buildings: Design of Buildings to Optimize Resistance to Blast Loading*, pp. 20-80, London: Thomas Telford, 1995.
- [13] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for The Design of Offshore Facilities Against Fire and Blast Loading*, pp. 35-50, New York: API Publications, 2006.
- [14] R. Cimo, *Analytical Modeling to Predict Bridge Performance Under Blast*