

## تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی موج انفجار با لحاظ نمودن موانع هندسی در محیط انفجار

امین حسنوند<sup>۱\*</sup>، سعید توانگر روستا<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشگاه لرستان، خرم‌آباد ۲- استادیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
(تاریخ وصول: ۹۵/۱۰/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۱۶)

### چکیده

در تحقیق حاضر موج انفجار با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به شکل دینامیکی و سه بعدی شبیه سازی شده است. برای این منظور مشخصات ماده انفجاری و ابعاد موانع محیط انفجار در نرم افزار Ansys Fluent وارد شده و شبیه سازی CFD انجام شده است. جهت اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه سازی انفجار از داده های آزمایشگاهی گزارش شده در منابع استفاده شده است. نتایج نشان می دهند که شبیه سازی CFD انفجار در تحقیق حاضر، تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی دارد. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف بر موج انفجار بررسی شده است. این پارامترها شامل فاصله کانون انفجار از مانع، ارتفاع مانع، انرژی انفجاری، زمان آزادسازی انرژی انفجاری و حضور و عدم حضور مانع می باشند.

واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، انفجار، موج شوک، اضافه فشار، اثر مانع.

## CFD Simulation of the Explosion Shockwaves with Consideration of Barrier Effects in the Explosion Environment

A. Hassanvand<sup>1\*</sup>, S. Tavangar Rosta<sup>2</sup>

1-Lorestan University

2- Maleke Ashtar University of Technology

(Received: 1/1/2017, Accepted: 2/4/2017)

### Abstract

In this research, three dimensional transient simulations of explosion shockwaves have been performed by using computational fluid dynamics (CFD). For this purpose, the characteristics of explosive mass and the geometry of explosion environment have been imported to Ansys Fluent CFD software. The simulation results have been validated by using experimental data obtained from literature. The comparisons between computational and experimental results show that CFD is a versatile means to predict the characteristics of explosion shockwaves. Afterwards, the effects of different parameters on explosion shockwaves have been investigated. These parameters are the distance of explosive from barrier, barrier height, explosion energy, explosion energy release time and the absence of barrier.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Explosion, Shockwaves, Overpressure, Barrier Effect.

## ۱- مقدمه

توسعه داده شده است، این مدل در بسته نرم افزاری CHAOS موجود است [۱۰]. این مدل ابتدا برای مدل‌سازی انفجارهای گازی در ساختمان‌ها و بررسی نحوه انتشار شعله از اتاقی به اتاق دیگر استفاده می‌شد، اما هم اکنون به طور گسترده در مدل‌سازی انفجار استفاده می‌شود. مدل SCOPE بر مبنای فرآیندهای فیزیکی پیشنهادی توسط کاتس و ساموئل [۹] طوری توسعه داده شده است تا بتوان به کمک آن انفجارهای گاز در محیط‌های بسته نظیر سکویهای دریایی استخراج نفت را مدل‌سازی نمود.

مدلهای عددی یا دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) بر مبنای حل معادلات دیفرانسیل پاره ای حاکم بر فرآیند انفجار استوار می‌باشند. این مدلها از معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی که بر جریان سیال حاکم هستند شروع کرده و از یک سری مدل‌های بستار<sup>۱</sup> برای شبیه سازی آشفستگی استفاده می‌کنند. در این مدلها دامنه محاسباتی با استفاده از سلول‌های محاسباتی گسسته سازی شده و سپس روی این سلول‌ها از معادلات بقا و معادلات حالت گازی محصولات انفجار نسبت به زمان و مکان انتگرال گیری می‌شود. در این روش‌ها برخلاف مدل‌های قبلی ساده‌سازی کمتری اعمال شده و هندسه واقعی در آنها مورد تحلیل قرار می‌گیرد، بنابراین این مدلها کاربرد وسیع‌تری در زمینه شبیه سازی انفجار در هندسه‌های مختلف دارند. مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی انفجار گاز قبلاً گزارش شده است [۱۴-۱۱]. تعدادی کد CFD برای مدل‌سازی انفجار گاز موجود است که می‌توان آنها را به دو گروه کدهای ساده و توسعه‌یافته تقسیم‌بندی نمود. کدهای ساده ای مثل FLACS و AutoReaGas از روش مقاومتی توزیع تخلخل (PDR)<sup>۱۰</sup> برای در نظر گرفتن هندسه استفاده می‌کنند [۱۶-۱۴]. حال آنکه کدهای توسعه‌یافته نظیر CFX و FLUENT طرح‌های عددی پیچیده‌تری را برای بیان هندسه دامنه انفجار به کار می‌گیرند. شبیه‌سازی CFD انفجار با استفاده از این کدها بسیار مفید و کاربردی بوده و می‌تواند به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. روش دیگر شبیه سازی انفجار مبتنی بر مکانیک جامدات محاسباتی (CSM) است. که در این روش از حل عددی اجزاء محدود برای حل معادلات بقا و معادلات حالت استفاده می‌شود. در این روش مجموعه‌های پیچیده ای نظیر تداخل بین سیال و تغییر شکل سازه‌های جامد با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مواد شامل تعریف شکست سازه، جابه جایی و تغییر شکل نیز قابل لحاظ شدن است. دقت این روش به شدت تابع پارامترهای تجربی مربوط به معادلات حالت اجزاء انفجاری و خنثی محیط حل

موج انفجار ناشی از انفجار مواد منفجره جامد دارای دو فاز مثبت و منفی نسبت به فشار محیط است که حاصل این موج فشار، قدرت تخریب انفجار خواهد بود. نحوه وقوع انفجار را می‌توان با استفاده از دو روش کلی پیش‌بینی نمود، این دو روش شامل انجام آزمایش‌های میدانی و مدل‌های نظری است [۱]. چالشی که در مورد آزمایش‌های میدانی انفجار وجود دارد این است که انجام این آزمایش‌ها در مقیاس بزرگ مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار زیادی است [۲]، بنابراین در حال حاضر استفاده از مدل‌های نظری برای شبیه‌سازی انفجار رو به افزایش است. هم اکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی رفتار انفجاری گاز در دسترس است. این مدلها در سه گروه عمده دسته‌بندی می‌شوند، این دسته‌ها به ترتیب شامل مدل‌های تجربی<sup>۱</sup>، مدل‌های پدیده شناسانه<sup>۲</sup> و مدل‌های عددی می‌باشند.

مدل‌های تجربی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی توسعه داده می‌شوند، مدل‌های راهنمای تخلیه<sup>۳</sup> [۳]، هم ارز TNT<sup>۴</sup> [۴]، TNO [۵]، چند-انرژی<sup>۵</sup> (ME) [۶]، بکر-استرولو (BS) [۷ و ۸] و ارزیابی ازدحام<sup>۶</sup> (CA) [۹] نمونه ای از مدل‌های تجربی هستند. از این مدلها به طور گسترده برای کاهش آثار مخرب انفجارهای ناگهانی بر تجهیزات و ساختمان‌ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که این مدلها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی اندازه گیری شده در مخازن کوچک و متوسط توسعه داده شده اند، لذا صحت کاربرد آنها در محدوده ای است که برای آن به دست آمده اند. به کار بردن این مدلها در سایر حالات ممکن است باعث بروز خطای شدید در پیش‌بینی نحوه وقوع انفجار شود.

مدل‌های پدیده شناسانه، مدل‌های فیزیکی ساده‌شده‌ای هستند که تلاش می‌کنند فرآیندهای فیزیکی غالب در یک انفجار را با استفاده از هندسه‌های ایده‌آل‌سازی شده و روابط تجربی مدل‌سازی کنند. مهم‌ترین ساده سازی این مدلها آن است که هندسه واقعی به یک هندسه مدل تبدیل می‌شود. در این مدلها فیزیک فرآیند احتراق ممکن است یا به صورت تجربی بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی و یا به صورت نظری بیان شود. این مدلها وقتی که هندسه واقعی دارای ساختاری تکرار شونده از ردیف‌های موانع باشد جواب‌های قابل قبولی به دست می‌دهد، اما برای هندسه‌های پیچیده استفاده از این آنها توصیه نمی‌شود. دو مدل CLICHÉ<sup>۷</sup> و SCOPE<sup>۸</sup> نمونه‌هایی از مدل‌های پدیده شناسانه می‌باشند. مدل CLICHÉ توسط شرکت گاز بریتانیا

9- Closure Models

10- Porosity Distributed Resistance

1- Correlation Based Models

2- Phenomenological Models

3- Venting Guidelines

4- TNT Equivalence Model

5- Multi-Energy Model

6- Congestion Assessment

7- Confined Linked Chamber Explosion

8- Shell Code for Overpressure Prediction in Gas Explosions

احساس می شود. لذا در تحقیق حاضر موج انفجار با استفاده از روش های مذکور به شکل دینامیکی و سه بعدی شبیه سازی شده و نتایج آن با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. در نهایت با استفاده از این مدل دینامیک سیالات محاسباتی اعتبارسنجی شده، تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر انفجار مطالعه شده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- معادلات حاکم

با توجه به نوع جریان مورد بررسی در این پژوهش، شکل کامل معادلات ناویر-استوکس تراکم پذیر مورد استفاده قرار گرفته است. شکل انتگرالی این معادلات به صورت معادله (۱) است [۲۲]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV \quad (1)$$

که در معادله (۱) بردارهای  $\mathbf{W}$ ،  $\mathbf{F}$  و  $\mathbf{G}$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v u + p_i \\ \rho v v + p_j \\ \rho v w + p_k \\ \rho v E + p v \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{pmatrix} \quad (2)$$

در معادله (۱) بردار  $\mathbf{H}$ ، ترم چشمه ها نظیر چشمه معادله انرژی و چشمه مربوط به نیروهای بدنه ای را شامل می شود. در تحقیق حاضر جهت شبیه سازی CFD انفجار، انرژی انفجار در محل ماده منفجره در مدت زمان انفجار در ابتدای شبیه سازی به صورت یک عبارت چشمه به معادله انرژی وارد شده است. پس از گذشت مدت زمان انفجار این ترم از معادله انرژی حذف شده و شبیه سازی تا زمان دلخواه انجام شده است. برای جلوگیری از واگرایی، شبیه سازی با گام های زمانی کوچک شروع شده و به تدریج اندازه گام های زمانی افزایش یافته است. در معادله (۲)  $\rho$ ،  $v$ ،  $E$  و  $p$  به ترتیب چگالی، سرعت، انرژی کل و فشار بوده و  $\tau_{ij}$  و  $q$  تانسور تنش و بردار انتقال حرارت هستند. جزئیات مربوط به معادلات حاکم به تفصیل گزارش شده است [۲۲].

جریان سیال ناشی از انفجار، جریانی تراکم پذیر و مغشوش است. در تحقیق حاضر از معادله حالت گاز کامل برای پیش بینی رفتار گاز تراکم پذیر و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  برای شبیه سازی اغتشاش استفاده شده است. علت انتخاب مدل  $k-\epsilon$  آن است که این مدل علیرغم دارا بودن زمان محاسباتی پایین، جواب های قابل قبولی در شبیه سازی CFD انفجار به دست می دهد [۱۹]. معادلات مدل  $k-\epsilon$  به صورت زیر می باشند [۲۳]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - \rho \epsilon \quad (4)$$

است [۱۷]. دستیابی به پارامترهای تجربی معادلات حالت برای موارد کاربردی، نیازمند انجام آزمون های دقیق در این حیطه است [۱۸]. بررسی منابع موجود نشان می دهد که استفاده از کدهای توسعه یافته نظیر CFX و FLUENT برای شبیه سازی انفجار در تعداد بسیار معدودی از مطالعات گزارش شده است. از جمله آن ها مطالعه انجام شده توسط اسکلاوس و ریگاس است [۱۹]. این محققین تولید و انتشار موج انفجار را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی با استفاده از نرم افزار CFX مطالعه کردند. آن ها برای شبیه سازی CFD تولید و انتشار موج انفجار از روش فشار مبنا<sup>۱</sup> و برای گسسته سازی عبارت های جابه جایی معادلات مومنتوم از طرح رو به باد مرتبه اول<sup>۲</sup> استفاده کردند. لازم به ذکر است که استفاده از روش فشار مبنا و این طرح گسسته سازی برای جریان های تراکم پذیر با سرعت بالا مناسب نبوده و این روش ها نمی توانند شوک ناشی از انفجار را به درستی تخمین بزنند. امروزه روش های عددی پیشرفته تری برای شبیه سازی جریان های تراکم پذیر همراه با شوک ارائه شده است که از جمله آن ها می توان به روش رو<sup>۳</sup> برای گسسته سازی عبارت های جابه جایی در حالت چگالی مبنا<sup>۴</sup> اشاره کرد [۲۰]. روش رو به دلیل استفاده از تقریب ریمان برای گسسته سازی عبارت های جابه جایی قادر به تشخیص جهت انتشار شوک بوده و می تواند شوک را با دقت بالایی تسخیر کند. سوهیمی و همکاران [۲۱] با استفاده از روش رو اثر موج انفجار بر یک ساختار را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین تولید و انتشار موج انفجار را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی با نرم افزار FLUENT مطالعه کردند. اما نتایج شبیه سازی آن ها خطایی بسیار زیادی نسبت به داده های آزمایشگاهی نشان می داد. دلیل اول بروز این مقدار خطا در مطالعه سوهیمی و همکاران [۲۱] به نحوه شبکه بندی دامنه محاسباتی توسط آن ها باز می گردد، این محققین برای شبیه سازی جریان های تراکم پذیر با سرعت بالا از المان بی سازمان استفاده کردند. استفاده از این نوع المان در این نوع جریان باعث بروز خطای محاسباتی می گردد. دلیل دوم بروز خطا در مطالعه این محققین مربوط به تعداد المان های مورد استفاده توسط آن ها است. نتیجه ای که از بررسی مطالعه انجام شده توسط سوهیمی و همکاران [۲۱] حاصل می شود این است که در شبیه سازی انفجار با استفاده از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی دقت جواب ها تا حد بسیار زیادی به ساختار شبکه و همچنین تعداد المان های مورد استفاده وابسته است. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده نیاز به انجام مطالعه ای در زمینه شبیه سازی انفجار با استفاده از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای روش تسخیر شوک رو با در نظر گرفتن حساسیت این روش به ساختار شبکه و همچنین تعداد المان ها

- 1- Pressure Based
- 2- First Order Upwind
- 3- Roe Method
- 4- Density Based

**جدول ۲-** مقایسه مدت زمان فاز مثبت حاصل از شبیه سازی در شبکه های مختلف با داده های آزمایشگاهی [۱۹].

خطا (%)	مدت زمان فاز مثبت (ms)		تعداد المان های شبکه محاسباتی
	داده آزمایشگاهی [۱۹]	شبیه سازی CFD	
۲۸/۱	۸/۹	۱۱/۴	۲۴۶۴۹۲
۷/۵	۸/۹	۹/۵	۹۸۵۹۶۴
۲/۲	۸/۹	۹/۱	۳۹۴۳۸۷۲

در شکل (۱) B طول موانع، A عرض موانع، H ارتفاع موانع و L1 فاصله کانون انفجار از دیواره اول، L2 فاصله دو مانع و L3 فاصله مانع سوم از فشارسنج های ۳ و ۴ و ۵ بوده و به ترتیب برابر ۸/۵، ۰/۶، ۰/۶، ۱/۷، ۱/۲ و ۱/۸ متر می باشند. جهت انجام شبیه سازی، هندسه ای با طول (Y) ۸۰m، عرض (X) ۴۵m و ارتفاع (Z) ۵m در نرم افزار Gambit ایجاد شده است. در این هندسه ماده منفجره به صورت مکعبی با طول، عرض و ارتفاع ۶cm به عنوان یک ناحیه سیال مجزا تعریف شده است. ابعاد این ناحیه با توجه به ویژگی های ماده منفجره مورد استفاده در تحقیق حاضر (جدول ۱) به دست آمده است. مقایسه ابعاد ناحیه ماده منفجره و کل دامنه محاسباتی نشان می دهد که تولید شبکه در این مورد مسئله ای چالش برانگیز است. چالش ایجاد شده به این دلیل است که اگر اندازه شبکه مورد استفاده در کل دامنه محاسباتی به اندازه شبکه مورد استفاده در ناحیه ماده منفجره نزدیک باشد، تعداد المان ها به شدت افزایش می یابد. علاوه بر این، در تحقیق حاضر شبیه سازی جریان تراکم پذیر به صورت گذرا با طول گام ریز انجام می شود، لذا زمان انجام محاسبات بسیار طولانی است. از طرف دیگر، اگر اندازه المان ها در نزدیکی ناحیه ماده منفجره و موانع به اندازه کافی ریز نباشد، خطای محاسباتی زیاد می شود. بنابراین شبکه محاسباتی باید طوری بهینه سازی شود که هم اندازه المان ها در نواحی ذکر شده مناسب بوده و هم زمان انجام محاسبات قابل قبول باشد. برای این منظور شبکه های مختلفی ایجاد شده و نتایج حاصل آن ها با هم و با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده اند. نحوه شبیه سازی انفجار در هر شبکه به این صورت است که در زمان انفجار، انرژی انفجاری در محل ماده منفجره به عنوان یک عبارت چشمه وارد دامنه محاسباتی شده و پس از سپری شدن زمان انفجار این ترم چشمه برداشته می شود. گام های زمانی در این مورد عبارت است از: ۱۰ گام با اندازه  $1 \times 10^{-8}$  s، ۱۲ گام با اندازه  $1 \times 10^{-7}$  s، ۱۰ گام با اندازه  $1 \times 10^{-6}$  s و ۳۰۰۰ گام با اندازه  $1 \times 10^{-5}$  s. شکل (۲) نحوه تولید و انتشار موج انفجار را نشان می دهد. در مطالعه حاضر جهت اعتبارسنجی شبیه سازی CFD از داده های آزمایشگاهی ثبت شده در فشارسنج اول استفاده شده است. در جدول (۲) مدت زمان فاز مثبت<sup>۱</sup> حاصل از شبیه سازی CFD در شبکه-

معادلات (۳) و (۴) به ترتیب معادله انتقال انرژی جنبشی اغتشاش (k) و معادله انتقال تلفات اغتشاش (ε) می باشند. در این معادلات  $\mu_t$  لزجت آشفتگی است که به صورت زیر محاسبه می شود

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که در نزدیکی دیواره به دلیل استفاده از شرط مرزی عدم لغزش باید تمهیدات خاصی در مدل های اغتشاش برای شبیه سازی جریان در نظر گرفته شود. در نزدیکی دیواره مقدار انرژی جنبشی اغتشاش به سمت صفر میل می کند که شبیه سازی آن به وسیله شبکه موجود ممکن نخواهد شد و برای غلبه بر آن باید از توابع دیواره و یا توابع میراکننده استفاده کرد [۲۴]. در تحقیق حاضر از توابع دیواره استاندارد برای شبیه سازی جریان در نزدیکی دیواره استفاده شده است. جزئیات مربوط به مدل آشفتگی k-ε به تفصیل در مرجع [۲۳] آمده است.

## ۲-۲- روش عددی و شرایط مرزی

در تحقیق حاضر، شبیه سازی موج انفجار به صورت دینامیکی و سه بعدی با نرم افزار Ansys Fluent نسخه 6.3 انجام شده است [۲۴]. برای حل معادلات، از روش حجم محدود چگالی مینا در شبکه با سازمان استفاده شده است. گسسته سازی زمانی با استفاده از طرح ضمنی مرتبه اول انجام شده است. برای تعیین شارهای جابه جایی از روش رو با دقت مرتبه دوم [۲۰]، برای شارهای لزج از تقریب تفاضل مرکزی و روش سلول مینای گاوس استفاده شده است. برای گسسته سازی عبارت های جابه جایی در معادلات مربوط به آشفتگی، طرح اختلاف بالادست درجه اول به کار رفته است. شرایط مرزی مورد استفاده در تحقیق حاضر عبارت اند از: شرط مرزی عدم لغزش برای زمین و دیواره ها و شرط مرزی میدان فشار دور دست برای کلیه مرزهای خروجی جریان سیال از دامنه محاسباتی.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- اعتبارسنجی شبیه سازی CFD

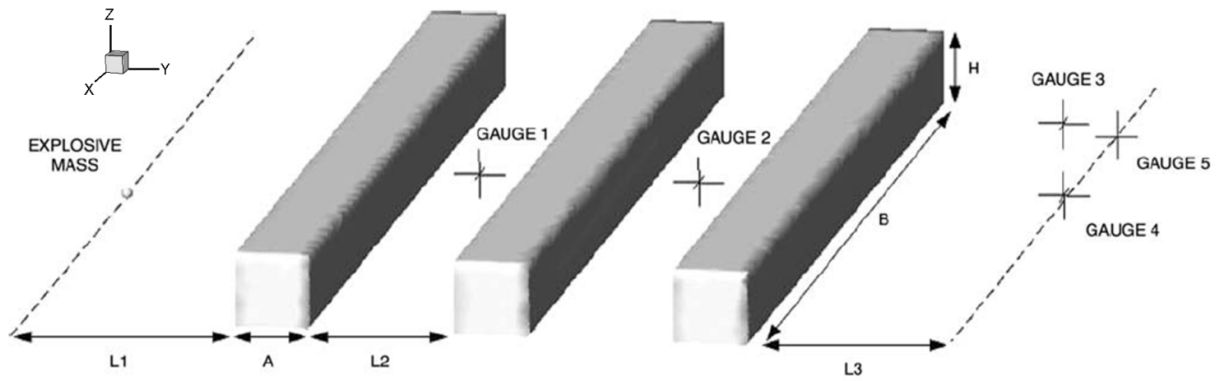
جهت بررسی صحت شبیه سازی های CFD انفجار در تحقیق حاضر از کار آزمایشگاهی انجام شده توسط اسکلاونوس و ریگاس [۱۹] استفاده شده است. این محققین، تولید و انتشار موج فشاری در هندسه ای مانند شکل (۱) را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت عددی مطالعه کرده اند.

**جدول ۱-** ویژگی های ماده منفجره مورد استفاده در مسئله اعتبارسنجی استخراج شده از مرجع [۱۹].

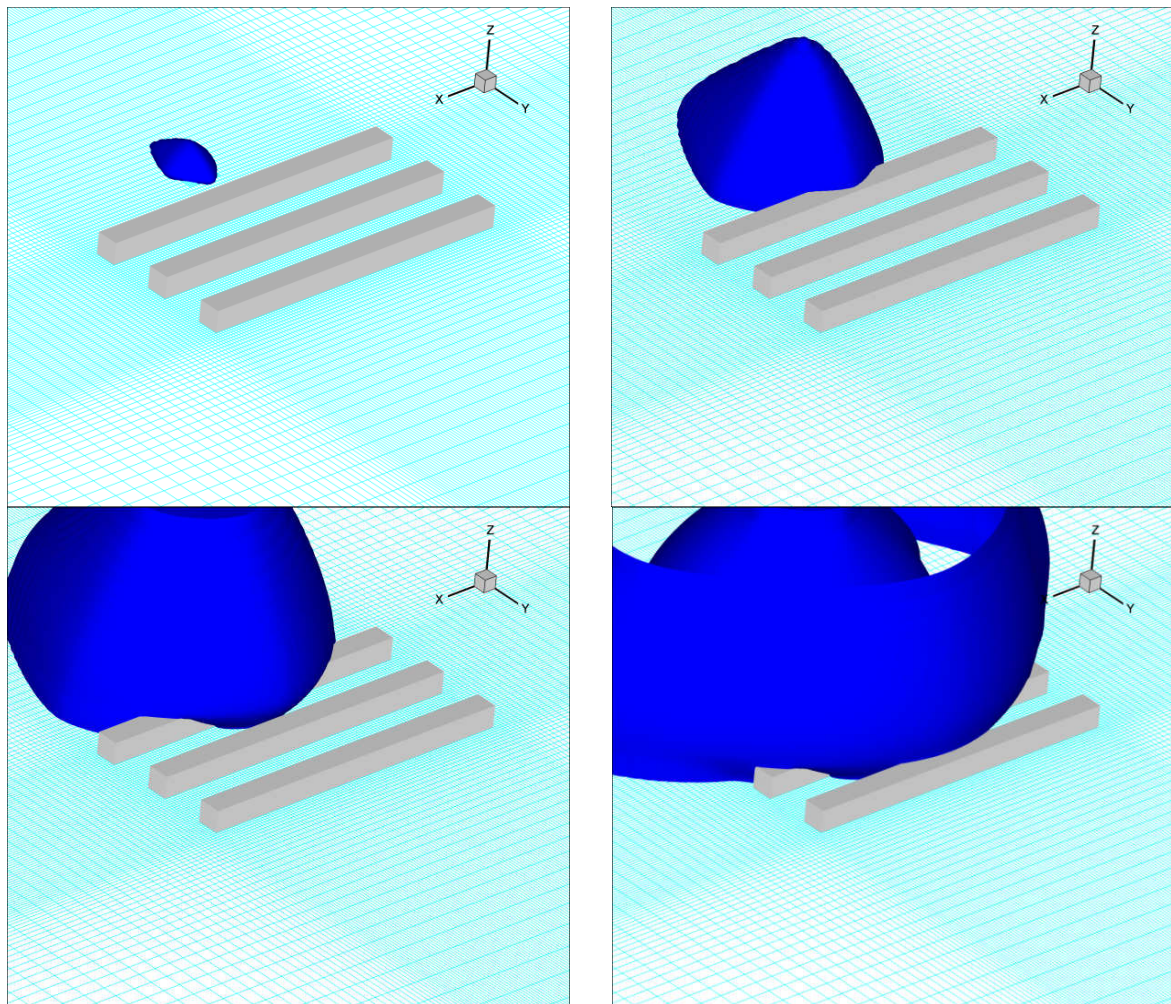
کمیت فیزیکی	انرژی بر واحد جرم (kj/kg)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	زمان انفجار (s)	قدرت انفجار (j/s)
مقدار	۵۸۷۶	۱۵۶۰	$5/3 \times 10^{-6}$	$3/6 \times 10^{+11}$

با ۳۹۴۳۸۷۲ کمتر از ۵٪ است، اما زمان انجام محاسبات با این شبکه خیلی کمتر از شبکه دیگر است. لذا این شبکه به عنوان شبکه مرجع در شبیه سازی در نظر گرفته شده است.

های مختلف با داده های آزمایشگاهی [۱۹] مقایسه شده است. همان طور که در این جدول پیداست شبکه ای با ۳۹۴۳۸۷۲ المان نسبت به داده های آزمایشگاهی کمترین خطا را به دست می دهد. این جدول همچنین نشان می دهد که خطای شبکه ای با ۹۸۵۹۶۴ المان نسبت به شبکه ای



شکل ۱- هندسه مورد استفاده در مطالعه انجام شده توسط اسکالونوس و ریگاس [۱۹].



شکل ۲- نحوه تولید و انتشار موج انفجار.

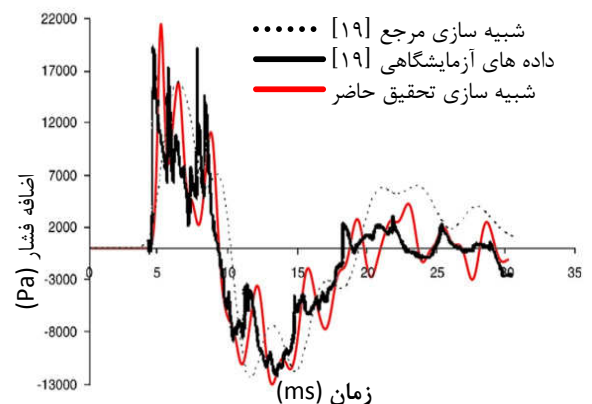
شامل انرژی انفجار، زمان آزادسازی انرژی انفجار، حضور و عدم حضور مانع، ارتفاع مانع و فاصله کانون انفجار از مانع می باشند. جهت بررسی این پارامترها هفت مورد شبیه سازی انجام شده است که در جدول (۳) ویژگی‌های آن‌ها آمده است. این شبیه سازی‌ها در چهار هندسه مختلف انجام شده‌اند. در شکل (۴) نمونه ای از این هندسه‌ها با طول (Y)  $7/5m$ ، عرض (X)  $14m$  و ارتفاع (Z)  $5m$  برای شبیه سازی موارد ۱ تا ۴ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این هندسه آن است که با استفاده از آن زمان انجام محاسبات به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. لازم به ذکر است که در شبیه سازی CFD انفجار به دلیل بالا بودن سرعت، نقاط دامنه محاسباتی از بالادست جریان تأثیر پذیرفته و در نتیجه حذف پایین دست، بر داده های فشاری حاصل از حل CFD در بالادست بی تأثیر است. ابعاد هندسه های مورد استفاده برای شبیه سازی موارد ۵ و ۶ مانند هندسه موارد ۱ تا ۴ است با این تفاوت که در هندسه مورد ۵ مانعی وجود نداشته و در هندسه مورد ۶ ارتفاع مانع نسبت به موارد ۱ تا ۴ دو برابر شده است. برای شبیه سازی مورد ۷ هندسه ای با طول (Y)  $9/3m$ ، عرض (X)  $14m$  و ارتفاع (Z)  $5m$  ایجاد شده است. علت افزایش طول دامنه محاسباتی در این هندسه نسبت به سایر موارد این است که هدف از این مورد بررسی تأثیر فاصله کانون انفجار است. سایر پارامترهای هندسی نظیر طول و عرض مانع در کلیه موارد و همچنین نحوه شبیه سازی CFD انفجار در آن‌ها، مانند مورد شبیه سازی شده در بخش اعتبارسنجی است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر قدرت انفجار، نقطه ای به فاصله  $0/6m$  از وسط مانع با ارتفاع  $30cm$  به عنوان نقطه معیار در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- ویژگی‌های موارد شبیه سازی شده.

شماره مورد	فاصله کانون انفجار از مانع (m)	ارتفاع مانع (m)	قدرت انفجار (j/s)	زمان انفجار (s)
۱	۱/۷	۰/۶	$3/6 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$
۲	۱/۷	۰/۶	$5/4 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$
۳	۱/۷	۰/۶	$1/8 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$
۴	۱/۷	۰/۶	$7/2 \times 10^{+11}$	$2/6 \times 10^{-6}$
۵	۱/۷	۰	$3/6 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$
۶	۱/۷	۱/۲	$3/6 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$
۷	۳/۴	۰/۶	$3/6 \times 10^{+11}$	$5/3 \times 10^{-6}$

جهت بررسی تأثیر ویژگی‌های ماده منفجره بر موج انفجار دو سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. این سناریوها طوری طراحی شده‌اند تا بتوان به کمک آن‌ها تأثیر نوع ماده منفجره (از لحاظ انرژی ماده منفجره و همچنین سرعت انفجار) بر موج انفجار را بررسی نمود. طراحی سناریوی اول انفجاری به این صورت است که در آن قدرت انفجار در زمان انفجار ثابت تغییر داده شده است. جهت بررسی سناریوی انفجاری اول موارد ۱، ۲ و ۳ شبیه سازی شده است. در شکل (۵) تغییرات اضافه فشار ایجاد شده با

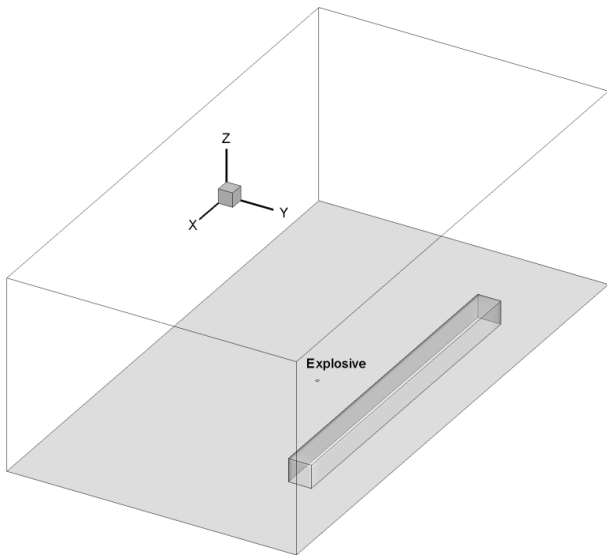
در شکل (۳) تغییرات اضافه فشار با زمان در محل فشارسنج اول حاصل از شبیه سازی CFD تحقیق حاضر و همچنین شبیه سازی انجام شده توسط اسکالونوس و ریگاس [۱۹] با استفاده از نرم افزار CFX و داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده توسط همین محققین باهم مقایسه شده‌اند. لازم به ذکر است که فشارسنج در فاصله  $0/6$  متری از وسط موانع اول و دوم و در ارتفاع  $30cm$  از زمین واقع شده است. محل فشارسنج اول در شکل (۱) با عنوان Gauge1 مشخص شده است. همان طور که در شکل (۳) پیداست، شبیه سازی CFD حاصل از تحقیق حاضر جواب‌های بسیار خوبی نسبت به داده های آزمایشگاهی به دست می دهد. این شکل همچنین نشان می دهد که در شبیه سازی انجام شده توسط اسکالونوس و ریگاس [۱۹] یک پیک فشاری نرم در بازه زمانی ۵ تا ۱۰ میلی ثانیه پیش‌بینی شده است حال آنکه داده های آزمایشگاهی حضور تعداد بیشتری پیک با تندی بالاتری را نشان می دهد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی انجام شده در تحقیق حاضر با داده‌های آزمایشگاهی می‌توان این نکته را دریافت که شبیه سازی انجام شده در تحقیق حاضر نسبت به شبیه سازی انجام شده توسط اسکالونوس و ریگاس [۱۹] از دقت بالاتری در پیش بینی ویژگی‌های انفجار برخوردار است. این محققین تولید و انتشار موج انفجار را با استفاده از روش فشار مبنا با طرح گسسته سازی رو به باد مرتبه اول شبیه سازی نمودند. استفاده از روش فشار مبنا و این طرح گسسته سازی برای شبیه سازی جریان‌های تراکم پذیر با سرعت بالا مناسب نبوده و این روش‌ها نمی‌تواند شوک ناشی از انفجار را به درستی تخمین بزنند. در تحقیق حاضر از روش رو برای گسسته سازی عبارت‌های جابه جایی در حالت چگالی مبنا استفاده شده است. روش رو به دلیل استفاده از تقریب ریمان برای گسسته سازی عبارت‌های جابه جایی قادر به تشخیص جهت انتشار شوک بوده و می تواند شوک را با دقت بالایی تسخیر کند.



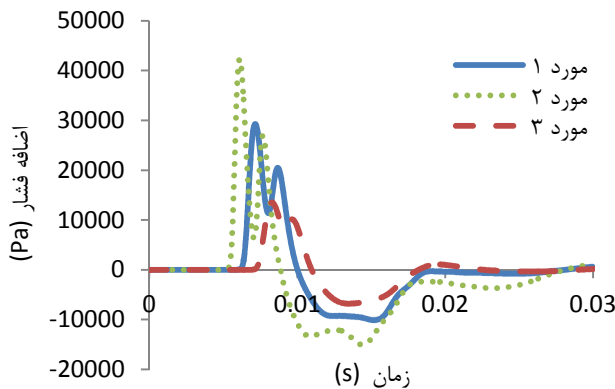
شکل ۳- اعتبارسنجی شبیه‌سازی CFD انجام شده در تحقیق حاضر.

### ۳-۲- تأثیر پارامترهای مختلف بر موج انفجار

در تحقیق حاضر تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر موج انفجار با استفاده از شبیه‌سازی CFD بررسی شده است. پارامترهای مطالعه شده



شکل ۴- هندسه و شبکه ایجادشده برای شبیه سازی موارد ۱ تا ۴.



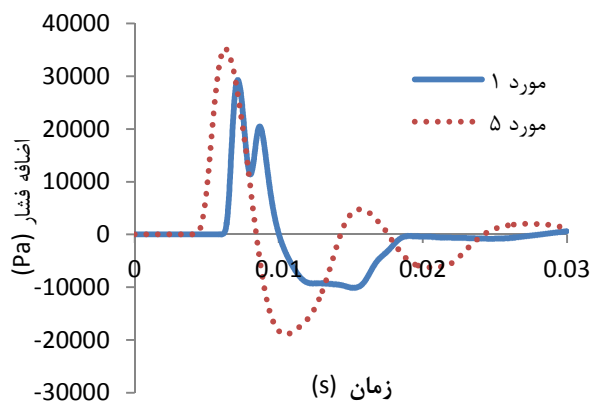
شکل ۵- تغییرات اضافه فشار با زمان حاصل از موارد ۱ تا ۳.

در ادامه جهت بررسی اثر ارتفاع مانع بر موج انفجار، موارد ۵ و ۶ شبیه سازی شده و نتایج حاصل از آن‌ها با مورد ۱ مقایسه شده است. در مورد ۵ حالتی در نظر گرفته شده است که مانعی وجود نداشته و مورد ۶ مربوط به حالتی است که در آن ارتفاع مانع نسبت به مورد ۱ دو برابر شده است. در شکل (۸) تغییرات اضافه فشار ایجادشده با زمان حاصل از شبیه سازی مورد ۵ با مورد ۱ مقایسه شده است. همان طور که در این شکل پیداست وقتی مانع برداشته می شود موج انفجار سریع تر به نقطه معیار رسیده و در این حالت پیک‌های فشاری مثبت و منفی بزرگ‌تری ایجاد می شوند. این شکل همچنین نشان می دهد که در وضعیت بدون مانع، مدت زمان فازهای مثبت و منفی انفجار بیشتر از حالت دیگر است. در شکل (۹) تغییرات اضافه فشار ایجادشده با زمان در نقطه معیار حاصل از شبیه سازی موارد ۱ و ۶ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل پیداست با افزایش ارتفاع مانع موج انفجار دیرتر به نقطه معیار رسیده و در این ارتفاع پیک‌های فشاری کوچک‌تری نسبت به وقتی که مانع کوتاه تر است ایجاد می شود. در شکل (۱۰) کانتور اضافه فشار در دو زمان مختلف از شبیه سازی مورد ۶ نشان داده شده است. مقایسه

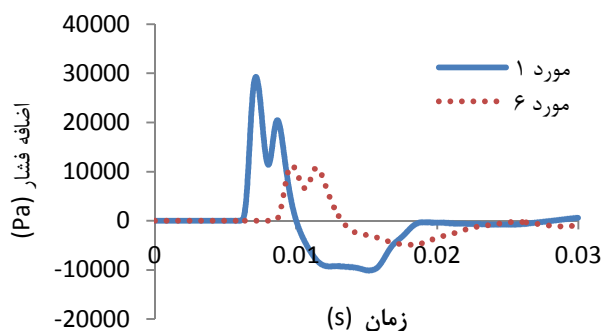
زمان در نقطه معیار حاصل از این سناریوی انفجاری نشان داده شده است. همان طور که در این شکل پیداست با افزایش انرژی انفجار در زمان انفجار ثابت موج انفجار سریع‌تر به نقطه معیار رسیده و همچنین پیک‌های فشاری بزرگ‌تری ایجاد می شوند. این موضوع در خصوص نقطه ثانویه حداکثر فشار که در اثر بازتابش موج فشاری رخ می دهد نیز مشخص است. ایمپالس یکی از پارامترهای اساسی جهت شناخت انفجار است که در هر نقطه مساحت زیر نمودار مقادیر مثبت اضافه فشار نسبت به زمان است. در جدول (۴) مقادیر ایمپالس در موارد مختلف شبیه سازی شده در نقطه معیار آمده است. جهت بررسی دقیق‌تر سناریوی اول انفجاری می توان مقادیر ایمپالس محاسبه شده در موارد ۱، ۲ و ۳ را باهم مقایسه کرد. همان طور که در جدول (۴) پیداست با افزایش انرژی انفجار در زمان ثابت میزان ایمپالس افزایش می یابد. این نتیجه دور از ذهن نیست زیرا با افزایش انرژی موج انفجار قوی‌تری ایجاد می شود. به منظور بررسی سناریوی انفجاری دوم، مورد ۴ شبیه سازی شده است و نتایج آن با نتایج مورد ۱ مقایسه شده است. در این دو مورد انرژی انفجار ثابت بوده اما زمان انفجار مورد ۴ نصف زمان انفجار مورد ۱ است. در واقع سرعت انفجار ماده منفجره در مورد ۴ بیشتر از ماده منفجره در مورد ۱ است. در شکل (۶) تغییرات اضافه فشار ایجادشده با زمان در نقطه معیار حاصل از این سناریوی انفجاری نشان داده شده است. همان طور که در این شکل پیداست با کاهش زمان انفجار در انرژی انفجار برابر، موج انفجار سریع‌تر به نقطه معیار رسیده و همچنین پیک‌های فشاری بزرگ‌تری ایجاد می شوند. شکل (۷) نحوه تولید و انتشار موج فشاری در مورد ۱ را نشان می دهد، همان طور که در این شکل پیداست با گسترش هرچه بیشتر موج، فشار اضافی کاهش یافته و بیشینه فشار موجود در دامنه محاسباتی کمتر می شود. نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول (۴) نشان می دهند که ایمپالس مورد ۴ حدوداً ۷۵٪ نسبت به مورد ۱ افزایش یافته است. مقایسه ایمپالس موارد ۱ تا ۴ نشان می دهد که مورد ۴ دارای بزرگ‌ترین ضربه نسبت به سایر موارد است یا به عبارت دیگر قدرت تخریب انفجار این نوع ماده منفجره بیشتر از سایر انواع است. نتیجه ای که از این دو سناریوی انفجاری به دست می آید این است که هرچه ماده منفجره سریع‌تر انرژی انفجاری را تخلیه کند موج انفجار قوی‌تری ایجاد می کند.

جدول ۴- مقادیر ایمپالس و زمان تداوم انفجار حاصل از موارد ۱ تا ۷.

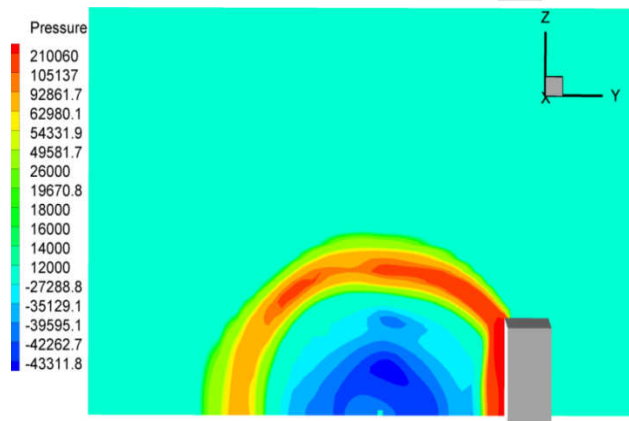
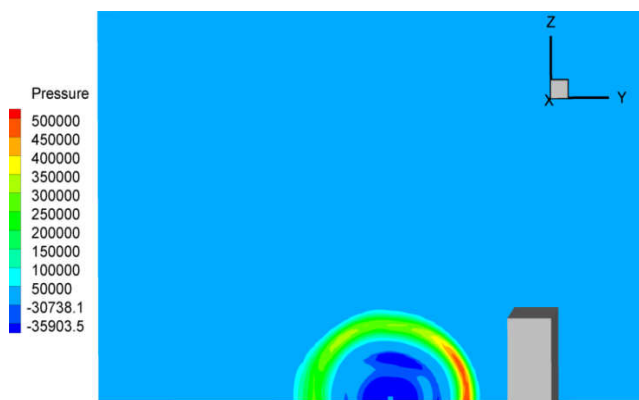
شماره مورد	ایمپالس (Pa.s)	زمان تداوم انفجار (ms)
۱	۵۳/۳	۴/۰
۲	۷۳/۸	۳/۸
۳	۲۹/۳	۴/۶
۴	۹۲/۸	۳/۷
۵	۸۱/۴	۴/۱
۶	۳۱/۵	۳/۹
۷	۴۷/۵	۴/۶



شکل ۸- تغییرات اضافه فشار با زمان حاصل از موارد ۱ و ۵.

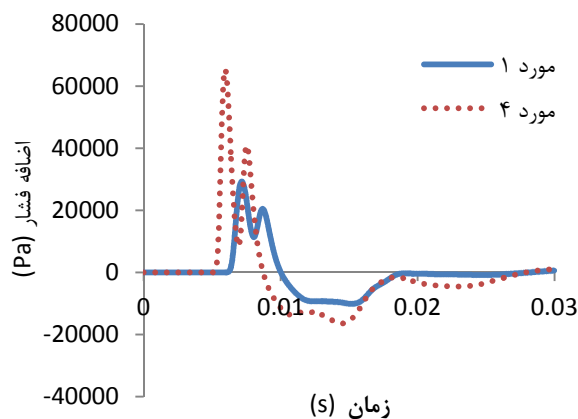


شکل ۹- تغییرات اضافه فشار با زمان حاصل از موارد ۱ و ۶.

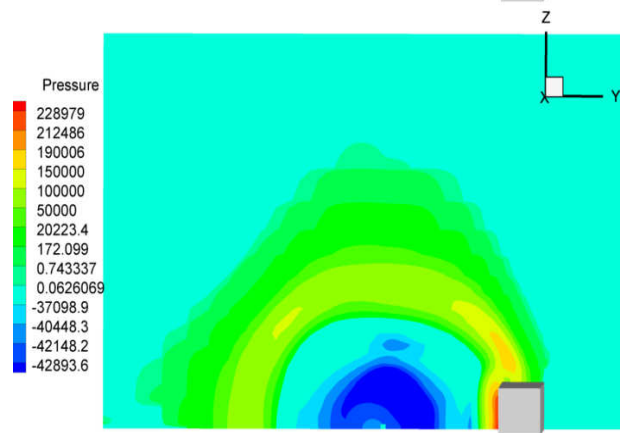
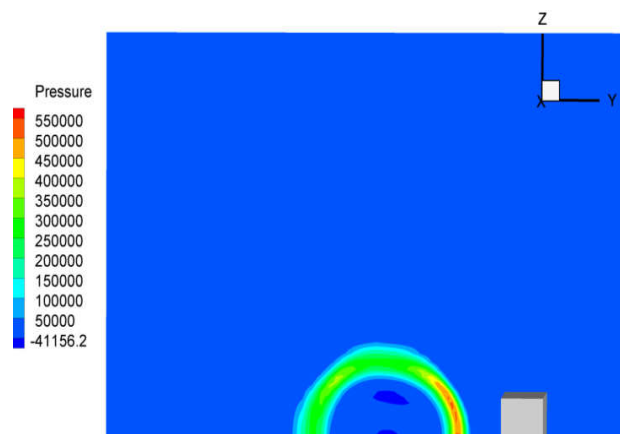


شکل ۱۰- کانتور اضافه فشار حاصل از شبیه سازی مورد ۱ در دو زمان مختلف: بالا ۰/۰۰۱۶۹۱ s، پایین ۰/۰۰۳۶۹۱ s.

ایمپالس محاسبه شده در موارد ۱، ۵ و ۶ در جدول (۴) نشان می دهد حضور مانع نسبت به عدم حضور مانع ایمپالس را حدود ۵۰٪ کاهش می دهد. این مقایسه همچنین نشان می دهد که با دو برابر شدن ارتفاع مانع، ایمپالس حدود ۴۰٪ کاهش می یابد.



شکل ۶- تغییرات اضافه فشار با زمان در حاصل از موارد ۱ و ۴.



شکل ۷- کانتور اضافه فشار حاصل از شبیه سازی مورد ۱ در دو زمان مختلف: بالا ۰/۰۰۱۶۶۴ s، پایین ۰/۰۰۳۶۶۴ s.



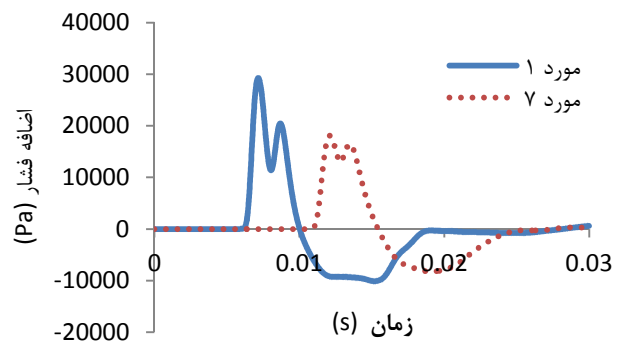
#### ۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر موج انفجار با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی بر مبنای روش تسخیر شوک رو با در نظر گرفتن حساسیت این روش به ساختار شبکه و همچنین تعداد المان‌ها به شکل دینامیکی و سه بعدی شبیه‌سازی شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که این مدل از دقت خوبی برای پیش‌بینی رفتار موج انفجار برخوردار است. در نهایت با استفاده از این مدل دینامیک سیالات محاسباتی اعتبارسنجی شده، تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر انفجار مطالعه شده است. این پارامترها شامل انرژی انفجار، زمان آزادسازی انرژی انفجار، حضور و عدم حضور مانع، ارتفاع مانع و فاصله کانون انفجار از مانع می‌باشند. نتایج مطالعه حاضر در مورد بررسی تأثیر ویژگی‌های ماده منفجره بر موج انفجار نشان می‌دهند که هرچه ماده منفجره سریع‌تر انرژی انفجاری را تخلیه کند موج انفجار قوی‌تری ایجاد می‌شود. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان می‌دهند که حضور مانعی با ارتفاع ۰/۶ m در فاصله ۱/۷ m از کانون انفجار، ایمپالس انفجار را تقریباً ۵۰٪ کاهش می‌دهد. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که با دو برابر شدن ارتفاع مانع، ایمپالس انفجار حدوداً ۴۰٪ کاهش یافته و با دو برابر شدن فاصله کانون انفجار از مانع، ایمپالس انفجار حدوداً ۱۱٪ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت نتیجه‌ای که می‌توان از تحقیق حاضر گرفت این است که ارتفاع مانع تأثیر بیشتری بر کاهش ضربه انفجار نسبت به فاصله مانع از کانون انفجار دارد.

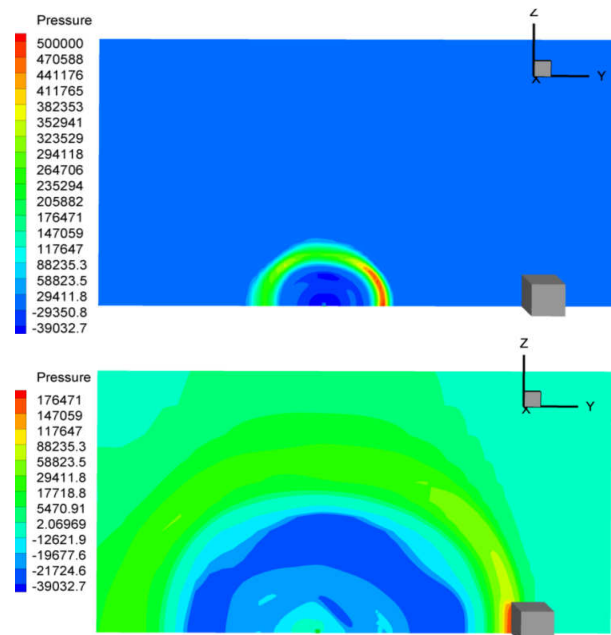
#### ۵- فهرست علائم

A	بردار سطح، $m^2$
$C_{1\varepsilon}$	ثابت مدل k-ε برابر ۱/۴۴
$C_{2\varepsilon}$	ثابت مدل k-ε برابر ۱/۹۲
$C_\mu$	ثابت مدل k-ε برابر ۰/۰۹
E	انرژی کل، z
$G_k$	تولید انرژی جنبشی توربولانس، $m^2s^{-2}$
$G_b$	تولید انرژی جنبشی توربولانس به دلیل شناوری، $m^2s^{-2}$
H	ترم چشمه معادلات انرژی و مومنوم
i, j, k	بردارهای یکه
K	انرژی جنبشی توربولانس بر واحد جرم، $m^2s^{-2}$
P	فشار، Pa
Q	بردار انتقال حرارت، z
T	زمان، s
U	سرعت در راستای x، m/s
V	سرعت در راستای y، m/s
V	حجم، $m^3$
w	سرعت در راستای z، m/s
X و Y	مؤلفه‌های افقی مختصات، m
Z	

در نهایت جهت بررسی تأثیر فاصله کانون انفجار بر موج انفجار مورد ۷ شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با مورد ۱ مقایسه شده است. مورد ۷ حالتی را در برمی‌گیرد که در آن فاصله کانون انفجار از مانع نسبت به مورد ۱ دو برابر شده است. در شکل (۱۱) تغییرات اضافه فشار ایجادشده با زمان در نقطه معیار حاصل از شبیه‌سازی مورد ۷ با مورد ۱ مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل پیداست با دورتر شدن مانع از کانون انفجار موج انفجار دیرتر به نقطه معیار رسیده و در این فاصله پیک‌های فشاری کوچک‌تری نسبت به فاصله دیگر ایجاد می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که تقریباً با دو برابر شدن فاصله کانون انفجار از مانع، اندازه بیشینه اضافه فشار مثبت ایجادشده نصف می‌شود حال آنکه در مورد فاز فشاری منفی این‌گونه نبوده و کمینه اضافه فشارهای حاصل از هر دو فاصله به هم نزدیک می‌باشند. شکل (۱۲) کانتور اضافه فشار در دو زمان مختلف از شبیه‌سازی مورد ۷ را نشان می‌دهد. مقایسه ایمپالس محاسبه‌شده در موارد ۱ و ۷ در جدول (۴) نشان می‌دهد که با دو برابر شدن فاصله کانون انفجار از مانع، ایمپالس حدوداً ۱۱٪ کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- تغییرات اضافه فشار با زمان با حاصل از موارد ۱ و ۷.



شکل ۱۲- کانتور اضافه فشار حاصل از شبیه‌سازی مورد ۷ در دو زمان مختلف: چپ ۰/۰۰۱۶۹۱ s، راست ۰/۰۰۷۶۹۱ s.

- [12] Hjertager, B. H.; Solberg, T. "A Review of Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Gas Explosions"; NATO Science Series 1999, 26, 77-91.
- [13] Paik, J. K.; Kim, B. J.; Jeong, J. S.; Kim, S. H.; Jang, Y. S.; Kim, G. S.; Woo, J. H.; Kim, Y. S.; Chun, M. J.; Czujko, J. "CFD Simulations of Gas Explosion and Fire Actions"; Ships Offshore Struct. 2010, 5, 3-12.
- [14] Hansen, O. R.; Kjellander, M. T.; Martini, R.; Pappas, J. A. "Estimation of Explosion Loading on Small and Medium Sized Equipment from CFD Simulations"; J. Loss Prevent. Proc. 2016, 41, 382-398.
- [15] Hansen, O. R.; Johnson, D. M. "Improved Far-Field Blast Predictions from Fast Deflagrations, DDTs and Detonations of Vapour Clouds using FLACS CFD"; J. Loss Prevent. Proc. 2015, 35, 293-306.
- [16] Zhang, Q.; Pang, L.; Liang, H. M. "Effect of Scale on the Explosion of Methane in Air and its Shockwave"; J. Loss Prevent. Proc. 2011, 24, 43-48.
- [۱۷] هدایتیان، مهدی؛ واحدی، خداداد "شبيه سازی عددی و تحلیلی پرتابه های فرسایشی سرعت بالا در اهداف بتنی مسلح به الیاف فولادی"، مجله علمی پژوهشی مواد پراثرژی، سال یازدهم، شماره ۲، صفحه ۷۳، ۱۳۹۵.
- [18] Weggel D. C. "Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites"; Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [19] Sklavounos, S.; Rigas, F. "Computer Simulation of Shock Waves Transmission in Obstructed Terrains"; J. Loss Prevent. Proc. 2004, 17, 407-417.
- [20] Roe, P. L. "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes"; J. Comput. Phys. 1997, 135, 250-258.
- [21] Sohaimi, A. S. M.; Risby, M. S.; Ishak, S. A. F. M.; Khalis, S.; Norazman, M. N.; Ariffin, I.; Yusof, M. A. "Using Computational Fluid Dynamics (CFD) for Blast Wave Propagation under Structure"; Procedia Comput. Sci. 2016, 80, 1202-1211.
- [22] Suzen, Y. B. "Numerical Computation of Compressible, Turbulent High-Speed Flows"; Ph.D. Thesis, Wichita State University, Ann Arbor, 1998.
- [23] Launder, B. E.; Spalding, D. B. "The Numerical Computation of Turbulent Flows"; Comput. Methods in Appl. Mech. Eng. 1974, 3, 269-289.
- [24] FLUENT User Manual, version 6.3, Fluent Inc., Lebanon, NH, USA, 2005.

## علائم یونانی

$\varepsilon$	نرخ تلفات توربولانس، $m^2 s^{-3}$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\mu$	ویسکوزیته دینامیک مولکولی، $kg m^{-1} s^{-1}$
$\mu_t$	ویسکوزیته دینامیک توربولانس، $kg m^{-1} s^{-1}$
$\sigma_k$	ثابت مدل k-ε برابر ۱/۰
$\sigma_\varepsilon$	ثابت مدل k-ε برابر ۱/۳
$\tau_{ij}$	تانسور تنش، $N/m^2$

## مراجع

- [1] Puttock, J. S.; Yardley, M. R.; Cresswell, T. M. "Prediction of Vapour Cloud Explosions Using the SCOPE Model"; J. Loss Prevent. Proc. 2000, 13, 419-431.
- [2] Cant, R. S.; Dawes, W. N.; Savill A. M. "Advanced CFD and Modeling of Accidental Explosions"; Annu. Rev. Fluid Mech. 2004, 36, 97-119.
- [3] Molkov, V.; Dobashi, R.; Suzuki, M.; Hirano, T. "Venting of Deflagrations: Hydrocarbon-Air and Hydrogen-Air Systems"; J. Loss Prevent. Proc. 2000, 13, 397-409.
- [4] Tang, M. J.; Baker, Q. A. "A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion"; Process Saf. Prog. 1999, 18, 235-240.
- [5] Wiekema, B. J. "Vapour Cloud Explosion Model"; J. Hazard. Mater. 1980, 3, 221-232.
- [6] Van Den Berg, A. C.; Versloot, N. H. A. "The Multi-Energy Critical Separation Distance"; J. Loss Prevent. Proc. 2003, 16, 111-120.
- [7] Baker, Q. A.; Tang, M. J.; Scheier, E. A.; Silva, G. J. "Vapor Cloud Explosion Analysis"; Process Saf. Prog. 1996, 15, 106-109.
- [8] Baker, Q. A.; Doolittle, C. M.; Fitzgerald, G. A.; Tang, M. J. "Recent Developments in the Baker-Strehlow VCE Analysis Methodology"; Process Saf. Prog. 1998, 19, 297-301.
- [9] Cates, A. T.; Samuels, B. "A Simple Assessment Methodology for Vented Explosions"; J. Loss Prevent. Proc. 1991, 4, 287-296.
- [10] Cleaver, R. P.; Humphreys, C. E.; Morgan, J. D.; Robinson, C. G. "Development of a Model to Predict the Effects of Explosions in Compact Congested Regions"; J. Hazard. Mater. 1997, 35-55.
- [11] Naamansen, P. "Modelling of Gas Explosions using Adaptive Mesh Refinement"; Ph.D. Thesis, Aalborg Universitetsforlag, Esbjerg, Denmark, 2002.