مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 63-71

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی اثر تغییر هندسه دیوار بلست بر افزایش میرایی موج بلست انفجار

سینا باقری[1]، سعید توانگر روستا[2]، محمدرضا صابر[3]، سیدهادی معتمدالشریعتی[4*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی تسلیحات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
2- استادیار، مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
4- مربی، ریاضیات محض، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
* تهران، صندوق پستی 1774-15875، shariati@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 دی 1395
پذیرش: 16 بهمن 1395
ارائه در سایت: 09 اسفند 1395

کلید واژگان:
دیوار بلست
موج بلست
دینامیک سیالات محاسباتی
هندسه سایبان

چکیده

دیوارهای بلست به‌منظور کاهش شدت موج بلست انفجار و محافظت از اهداف مهم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موانع با انعکاس بخشی از موج بلست به سمت منبع انفجار و ایجاد آشفتگی در جریان موج، شدت آن را کاهش می‌دهند. شکل هندسی دیوارهای بلست به عنوان عاملی تاثیرگذار می‌تواند موجب کاهش شدت موج بلست و افزایش اثر محافظتی این نوع موانع گردد. در این تحقیق زوایای خمیدگی مختلف دیوارهای بلست با شکل هندسی "سایبان"، به منظور دستیابی به یک زاویه بهینه خمیدگی با بیشترین میزان میرایی موج بلست مورد بررسی قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی برخورد موج بلست با دیوار از دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود و نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی که با استفاده از مدل آشفتگی LES انجام شده است، توصیف دقیق‌تری از مکانیزم میرایی موج بلست با استفاده از مانع با شکل هندسی سایبان ارائه کرده است. همچنین مقایسه‌ی نتایج بیشینه فشار و گردابه‌های ایجاد شده در پشت مانع سایبان با دیوار کاملاً عمودی، نشان می‌دهد که استفاده از مانع با هندسه‌ی سایبان تا حدود 14٪ میزان میرایی موج بلست را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، بررسی نمودار تغییر زاویه خمیدگی سایبان در مقابل عامل میرایی نشان می‌دهد که مناسب‌ترین زاویه خمیدگی برای این مانع قطعاً مقداری بین 67.5 و 73 درجه خواهد داشت.

Simulation of the blast wall geometry effect on the blast wave attenuation

Sina Bagheri[1], Saeed Tavangar Roosta[2], Mohammad Reza Saber[3], Seyyed Hadi Motamed Shariati[4*]

1-Department of Weapons Engineering, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran
2- Department of Chemical Engineering, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran
4- Department of Pure Mathematics, Malek-Ashtar University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, shariati@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 January 2017
Accepted 04 February 2017
Available Online 27 February 2017

Keywords:
Blast wall
Blast wave
Computational fluid dynamic
Canopy geometry

ABSTRACT

Blast walls are implemented in order to attenuate the explosion blast wave and protect the important objects. These obstacles decrease the blast wave intensity by reflecting a portion of the wave to the explosion source and producing turbulence in the blast wave flow. The geometrical shape of the blast wall, as an influential factor, decreases the intensity and increases the protective effect of these obstacles. In this thesis, the angle of curvature of the canopy blast walls was studied to find the optimum angle with the most attenuation effect. To simulate the interaction of the blast wave with the blast wall, computational fluid dynamic with the finite volume method and OpenFOAM software (an open source software) was used. The results of the simulation with LES turbulence model presented the more exact description for the attenuation of the blast wave interacted with the canopy blast wall. The comparison of the overpressure peak and the created vortexes behind the canopy and oblique wall, shows that the canopy wall increased the attenuation of the blast wave up to 14%. On the other hand, attenuation factor-canopy curvature angle chart has shown that the proper curvature angle of the canopy wall would be between 67.5 and 73 degrees.

1- مقدمه

دیوار بلست مانعی فیزیکی است که هدفی ارزشمند را از یک تهدید انفجاری تولید کننده‌ی موج بلست جدا می‌کند [1]. دیوارهای بلست به‌عنوان یک محافظ به‌منظور کاهش میزان آسیب‌رسانی موج بلست به هدف پشت دیوار عمل کرده و این کار را با انعکاس بخشی از انرژی موج بلست ورودی انجام می‌دهند. با افزایش حملات تروریستی در سال‌های اخیر و به منظور محافظت از اماکن مهم در مقابل این حملات، استفاده از دیوارهای بلست گسترش زیادی داشته است. همچنین انفجارهای ناخواسته در صنایع مختلف و خصوصاً صنایع نفت و گاز، خسارات سنگین مالی و جانی به بار آورده است. استفاده از دیوارهای بلست در محیط این صنایع می‌تواند محدوده‌ی تاثیر انفجار را کاهش داده و از وارد شدن آسیب جدی به تجهیزات جانبی محل انفجار و وقوع انفجارهای پی در پی جلوگیری کند [2].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Bagheri, S. Tavangar Roosta, M. R. Saber, S. H. Motamed Shariati, Simulation of the blast wall geometry effect on the blast wave attenuation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 63-71, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

عوامل مختلفی بر میزان بارگذاری موج بلست بر روی هدف مورد محافظت توسط دیوار بلست تاثیر می‌گذارند. این پارامترها شامل وزن خرج انفجاری، ارتفاع انفجار، ارتفاع دیوار، فاصله‌ی دیوار از خرج و فاصله‌ی هدف از دیوار بلست و درنهایت شکل هندسی دیوار بلست می‌باشند [1]. انگو و همکارانش [3] مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر میرایی موج بلست به هنگام برخورد با یک مانع را با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی کرده‌اند. آن‌ها دریافته‌اند که کاهش فشار موج بلست پشت یک سازه علاوه‌بر ارتفاع مانع، فاصله بین مرکز انفجار و مانع و فاصله‌ی بین سازه مورد محافظت و مانع، به ارتفاع سازه مورد محافظت نیز بستگی دارد. همچنین اسکلاوانوس و ریگاس [4] اثر تغییر ارتفاع و تغییر نحوه‌ی چینش ردیف موانع مقابل موج بلست را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توانستند اثر این تغییرات را با شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار CFX[1] و مدل آشفتگی k-ε بررسی نمایند و تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایش تجربی مشابه برقرار کنند. اما بررسی اثر تغییر هندسه‌ی دیوار بلست و خصوصاً استفاده از هندسه‌ی سایبان برای افزایش کارایی این دیوارها کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است.

دیوارهای بلست به شکل "سایبان" شامل دو قسمت عمودی و خمیده هستند. جهت قسمت خمیده‌ی این دیوارها به منظور افزایش میرایی موج بلست به هنگام برخورد مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که اگر این جهت به سمت محل انفجار باشد، کارایی این نوع موانع افزایش می‌یابد [5]. در نتیجه قسمت خمیده‌ی این نوع دیوارها در سمت منبع انفجار قرار می‌گیرد. اما یکی از موارد مهم در مورد این دیوارها، زاویه‌ی خمیدگی‌ای است که بتواند بخش بزرگتری از موج بلست انفجار را به سمت منبع انفجار بازگرداند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در خصوص دیوارهای بلست، در جایی که هندسه‌ی سایبان بررسی شده، به موثر بودن این نوع هندسه برای میرایی بیشتر موج بلست تاکید شده است [6,5,1]. رادک و همکارانش [7] در بخشی از تحقیق خود در خصوص بهینه‌سازی دیوارهای بلست، استفاده از دیوار با هندسه‌ی سایبان را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق به‌عنوان یک نتیجه و با استناد به نتایج آزمایش‌های تجربی، به افزایش میرایی موج بلست با افزایش زاویه‌ی خمیدگی مانع با هندسه‌ی سایبان اشاره شده است. لذا با توجه به نتیجه‌ی این تحقیق و سایر تحقیقات مشابه، در تحقیق حاضر نیز شبیه‌سازی برخورد موج بلست با مانع به شکل سایبان و با زوایای مختلف خمیدگی به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمایش‌های تجربی و بررسی دقیق‌تر دلایل این پدیده با استفاده از ابزار شبیه‌سازی عددی انجام گرفته است. همچنین استفاده از نتایج شبیه‌سازی عددی می‌تواند به بررسی دقیق‌تر مکانیزم میرایی موج بلست با استفاده از مانع با هندسه‌ی سایبان کمک نماید. در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی دو بعدی انتشار موج بلست انفجار ماده منفجره TNT در مقابل مانعی به شکل سایبان، با استفاده از روش عددی حجم محدود و نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم[2] انجام شده است. این شبیه‌سازی برای چهار زاویه خمیدگی صفر، 22.5، 45 و67.5 درجه تکرار شده و مقادیر بیشینه فشار فاز مثبت انفجار در این چهار شبیه‌سازی با مقادیر آن‌ها در شبیه‌سازی انفجار برای مانع کاملاً عمودی مقایسه شده است. همچنین برای درک بهتر پدیده‌ی آشفتگی جریان، مدل‌سازی آشفتگی و گردابه‌های موجود در جریان با استفاده از مدل آشفتگی LES انجام شده است. استفاده از این مدل آشفتگی کمک کرده است تا فهم دقیق‌تری از فرآیندهای برهمکنش موج بلست با دیواره‌های مانع حاصل شود. لذا علت افزایش میرایی موج بلست با تغییر زاویه‌ی خمیدگی مانع، به کمک بررسی محل قرارگیری گردابه‌های جریان آشفته مشخص شده است.

2- شبیه‌سازی عددی

2-1- معادلات حاکم و حلگر

برخلاف مدل‌های تجربی انفجار که تنها با استفاده از برقراری ارتباط بین مقادیر مشاهده شده در آزمایش‌های تجربی روابطی را برای انفجار ارائه می دهند [8]، در CFD[3] از روابط عمومی قطعی‌تری برای تقریب یک مسئله استفاده می‌شود. معادلات ناویر- استوکس به‌عنوان معادلات کلی توصیف جریان سیال در بسیاری از مسائل شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار می گیرند. در شبیه‌سازی عددی مسئله‌ی انفجار در این تحقیق نیز از معادلات ناویر– استوکس برای بقای جرم، ممنتوم و انرژی به‌عنوان معادلات حاکم بر مسئله استفاده شده است. معادله (1) بقای جرم، معادله (2) بقای ممنتوم و معادله (3) بقای انرژی را نشان می‌دهند [4].

$$\partial\rho/\partial t + \nabla\cdot(\rho U) = 0 \qquad (1)$$

$$\partial(\rho U)/\partial t + \nabla\cdot(\rho U \otimes \mathrm{U}) = -\nabla\cdot\left(P + \mu(\nabla U + (\nabla U)T)\right) + b \qquad (2)$$

$$\partial(\rho h_{\mathrm{tot}})/\partial t - \partial\rho/\partial t + \nabla\cdot(\rho U h_{\mathrm{tot}}) = -\nabla\,(\lambda\nabla(T)) \qquad (3)$$

که در این سه معادله ρ برابر دانسیته، U سرعت، b مجموع نیروهای بدنه، P فشار، λ پارامتر بی‌بعد و h_{tot} آنتالپی مخصوص کلی است. علاوه بر این سه معادله، معادله‌ی حالت گاز ایده‌آل به عنوان رابطه‌ی چهارم برای توصیف متغیرهای جریان گازهای موجود در مسئله مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت زیر می‌باشد:

$$P = (\gamma - 1)\rho e \qquad (4)$$

که در این معادله e انرژی داخلی ویژه است. نرم‌افزار اپن‌فوم که برای شبیه-سازی موج بلست در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است، برای حل مسائل جریان سیال از تعدادی حلگر بهره می‌گیرد که با توجه به خصوصیات مسئله موردنظر انتخاب می‌شوند. با توجه به تراکم‌پذیر بودن جریان در مسئله‌ی انفجار، در گروه حلگرهای جریان تراکم‌پذیر، حلگر سانیک‌فوم[4] که دارای نزدیک‌ترین ویژگی‌ها به شرایط مسئله‌ی حاضر می‌باشد برای استفاده در تحقیق حاضر انتخاب شده است. حلگر سانیک‌فوم از طرف دیگر در گروه حلگرهای فشارپایه است که معادلات بقا را برای متغیرهای اولیه‌ی $[\rho.u.e]$ حل می‌کنند. در این خانواده از حلگرها دانسیته از معادله‌ی حالت و فشار از معادله‌ی کوپل سرعت- فشار به‌دست می‌آید [9]. همچنین حلگر سانیک‌فوم قابلیت شناسایی موج شوک (موج بلست) را در حل عددی مسئله داشته و با استفاده از حلقه‌ی تکرار PISO[5] معادلات کوپل سرعت– فشار را حل می‌کند. در حلگر سانیک‌فوم برای گسسته‌سازی ترم‌های مشتقی از طرح اولر[6]، برای ترم‌های گرادیان از طرح عددی گوس خطی[7] و برای ترم‌های دیورژانس از طرح‌های عددی گوس خطی و اختلاف بالادست[8] استفاده شده است. همچنین برای گسسته‌سازی ترم‌های لاپلاسین[9] نیز از طرح عددی گوس خطی بهره گرفته است [10].

[1] computational fluid xerography
[2] OpenFOAM "The open field operation and manipulation"

[3] Computational Fluid Dynamics
[4] sonicFoam
[5] Pressure Implicit Split Operator
[6] Euler
[7] Linear gauss
[8] upwind
[9] laplacian

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

با توجه به ماهیت آشفته‌ی جریان در پدیده‌ی انفجار، مدل‌سازی آن در فرآیند حل عددی ضروری به نظر می‌رسد. آشفتگی حرکتی تصادفی و نامنظم است که خواص یک سیال را به‌شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. آشفتگی زمانی روی می‌دهد که نیروهای اینرسی در سیال برجسته شده و معمولاً با اعداد رینولدز بالا مشخص می‌شود [4]. یکی از مشخصه‌های جریان‌های آشفته گردابه‌ها هستند که اثر حضور آن‌ها در جریان آشفته در انفجار و در نزدیکی موانع در تحقیق برگر و همکارانش [11] مورد تاکید قرار گرفته است. در این تحقیق اثرات تغییر زاویه گشودگی[1]دو مانع متصل به دیواره‌های لوله شوک[2]و گردابه‌های نزدیک دیواره‌های مانع، با استفاده از سایه‌نگاری و شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. از نتایج مهم این تحقیق، اثر برجسته گردابه‌های شکل گرفته در نزدیکی دیواره‌ها بر افزایش میرایی موج بلست عبور کرده از موانع با زوایای گشودگی مختلف است. در نتیجه به دلیل اهمیت مدل‌سازی آشفتگی و گردابه‌های جریان به‌عنوان یکی از عوامل موثر بر نتایج و تحلیل‌های تحقیق حاضر، مدل آشفتگی LES با قابلیت شناسایی گردابه‌ها در جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. مدل آشفتگی LES به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های شبیه‌سازی آشفتگی جریان، در مقایسه با گروه مدل‌های RANS به جای میانگین‌گیری از معادلات ناویر-استوکس آن‌ها را فیلتر می‌کند. تابع فیلتر مورد استفاده در این مدل در جهت x به‌صورت زیر است:

$$\bar{u}_i = \int G(x\,.\,x')\, u_i\,(x')\, dx \qquad (5)$$

در این معادله $G(x\,.\,x')$ تابع فیلتر کرنل[3] نام دارد. پس از اعمال تابع فیلتر در معادلات بقای جرم (1)، بقای ممنتوم (2) و بقای جرم این معادلات به صورت معادلات (5)، (6) و (7) درمی‌آیند [12]:

$$\partial\bar{\rho}/\partial t + \nabla\cdot(\bar{\rho}U) = 0 \qquad (6)$$

$$\partial(\bar{\rho}U)/\partial t + \nabla\cdot(\bar{\rho}U\otimes U) = -\nabla\bar{P} + \nabla\cdot(\bar{s} - B) \qquad (7)$$

$$\partial(\bar{\rho}\mathrm{E})/\partial t + \nabla\cdot\,(\bar{\rho}UE) = \nabla\cdot\left(-\bar{P}U + \bar{s}U + \bar{h} - b_{\mathrm{E}}\right) \qquad (8)$$

در این معادلات علامت – نشان‌دهنده‌ی مقادیر فیلتر شده است. همچنین S تانسور تنش ویسکوز، $E = h\text{-}P/\rho\text{+}1/2U^2$ برابر انرژی، h آنتالپی، ترم $(U\otimes U)$ $B = \bar{\rho}$ و ترم $b_{\mathrm{E}} = \bar{\rho}UE$ می‌باشد. اثرات تنش‌های زیرشبکه، انتقال و از بین رفتن انرژی را افزایش می‌دهد. این اثرات با استفاده تقریب بوزینسک و با اضافه کردن یک جزء آشفته به ویسکوزیته آرام تقریب زده می‌شوند که در رابطه (9) آمده است:

$$\tau_{ij} - 1/3\,\tau_{kk}\delta_{ij} = 2\,\nu_{\mathrm{t}}\,\bar{s} \qquad (9)$$

در این رابطه τ_{ij} تانسور تنش زیرشبکه، ν_{t} ویسکوزیته آشفته و $\tau_{kk}\delta_{ij}$ تغییرات تانسور تنش را نشان می‌دهند. وظیفه‌ی مدل‌های زیرشبکه تقریب مقدار ویسکوزیته آشفته است. در تحقیق حاضر از مدل زیرشبکه یک-معادله[4] برای تقریب مقدار ویسکوزیته آشفته استفاده شده است. مدل یک-معادله در نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم برای انرژی جنبشی زیرشبکه یک معادله انتقال اضافی را حل می‌کند. در مدل‌های زیرشبکه اسماگورینسکی[5] فرض می‌شود که یک تعادل محلی بین انرژی انتقال داده شده از مقیاس‌های زیرشبکه و انرژی جنبشی تلف شده وجود دارد. اما در مدل یک- معادله چنین فرضی مطرح نیست و لذا به‌جای آن، یک معادله انتقال اضافی برای انرژی جنبشی زیرشبکه (k) درنظر گرفته شده است. در مرجع مدل زیرشبکه یک- معادله در نرم‌افزار اپن‌فوم معادله زیر برای محاسبه‌ی متغیر k (انرژی جنبشی) معرفی شده است [13]:

$$\partial(\mathrm{k})/\partial t + \partial(U\mathrm{k})/\partial t - \partial/\partial xi(\,\upsilon_{\mathrm{eff}}\,\partial\mathrm{k}/\,\partial\mathrm{xi}) = \upsilon_{\mathrm{eff}}(\partial(Ui)/\partial xj + \partial(Uj)/\,\partial xi)^2 - C_{\mathrm{e}}\mathrm{k}^{3/2}/\Delta \qquad (10)$$

که ثوابت این معادله از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\upsilon_{\mathrm{sgs}} = \mathrm{C_k} \times \sqrt{k}\ \times\ \Delta \qquad (11)$$

$$\upsilon_{\mathrm{eff}} = \upsilon_{\mathrm{sgs}} + \upsilon \qquad (12)$$

در تحقیق حاضر مقدار ثابت Δ برابر یک فرض شده است. همچنین مقادیر دو ثابت C_k (ثابت انرژی جنبشی انتقال داده شده از مقیاس زیرشبکه) برابر 0.094 و C_e (ثابت از بین رفتن انرژی) برابر 2.096 درنظر گرفته شده‌اند.

2-2- طراحی هندسه، شبکه‌بندی و شرایط مرزی

نخستین مرحله از شبیه‌سازی CFD موج بلست انفجار، تعریف دامنه‌ی حل عددی و مشخص کردن محل قرار گرفتن مانع و ماده منفجره است. موانع مورد بررسی در این تحقیق، همگی دارای ارتفاع یکسان 1متر، ضخامت 0.1 متر و در چهار زاویه خمیدگی صفر، 22.5، 45 و67.5 درجه می‌باشند. در هر شبیه‌سازی، مانع در مبدأ مختصات قرار گرفته و ماده منفجره در فاصله‌ی 2 متری از آن جایگذاری شده است. جهت ثبت مقادیر فشار، چهار سنجه به ترتیب در نقاط (2,0.3) ، (2,0.6)، (2,0.9) و (2,1.2) در پشت مانع درنظر گرفته شده است. کلیه شبکه‌های مورد استفاده مربعی و ساختار یافته بوده و به‌منظور امکان انجام محاسبات دقیق‌تر جریان، در نزدیکی مانع از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است.

پس از شبکه‌بندی هندسه مسئله و به منظور کامل کردن اطلاعات مورد نیاز در مورد هندسه‌ی مسئله، شرایط مرزی نیز تعریف می‌شود. در این تحقیق از دو نوع شرط مرزی "خروجی فشار" و "دیواره" استفاده شده است. هندسه، شرایط مرزی و محل قرار گرفتن سنجه‌های ثبت فشار در (شکل 1) مشخص شده است. همچنین شرط مرزی مورد استفاده برای هر یک از متغیرهای مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی، براساس تعاریف موجود برای انواع شرایط مرزی در نرم‌افزار اپن‌فوم [14] در (جدول 1) آمده است.

در (جدول 1) علاوه بر متغیرهای اصلی جریان شامل فشار (p)، دما (T) و سرعت (U)، متغیرهای دیگری نیز وجود دارد که مربوط به مدل آشفتگی LES می‌باشند. متغیر k مربوط به انرژی جنبشی، متغیر *epsilon* مربوط به اتلاف انرژی، متغیر *mut* ویسکوزیته‌ی جریان آشفته، ترم B همان‌طور که قبلاً

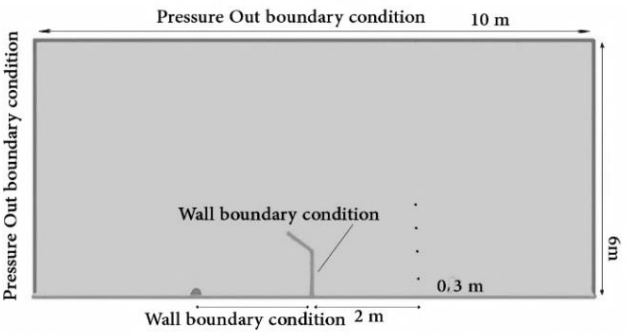


Fig. 1 Geometry, Meshing and probe position in recent problem

شکل 1 هندسه، شرایط مرزی و محل قرارگرفتن سنجه‌های فشار مسئله مورد بررسی

[1] Opening angle
[2] Shock tube
[3] Kernel
[4] One-equation
[5] Smagorisky

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

جدول 1 شرایط مرزی متغیرهای مورد استفاده

Table 1 Variables boundary conditions

متغیر	شرط مرزی خروجی فشار	شرط مرزی دیوار
P	waveTransmissive	zeroGradient
T	inletOutlet	zeroGradient
U	inletOutlet	fixedValue
k	inletOutlet	zeroGradient
epsilon	fixedValue	zeroGradient
alphaSgs	calculated	zeroGradient
mut	calculated	zeroGradient
B	inletOutlet	zeroGradient

نیز بیان شد برابر $\bar{\rho}(U \otimes U)$ و alphaSgs نیز متغیر واسطه در مدل زیرشبکه یک- معادله می‌باشد.

3-2- اعمال انرژی پتانسیل انفجار در مسئله

در قسمت قبل مشخصات هندسه، شبکه‌بندی، شرایط مرزی و حل عددی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مسئله شرح داده شد. اما یکی از مهمترین قسمت‌های حل مسائل انفجار با روش عددی حجم محدود، روش اعمال انرژی پتانسیل ماده منفجره در مسئله است. در تحقیق حاضر برای اعمال انرژی انفجار، از روش بالن فشرده استفاده شده است. ایده استفاده از روش بالن فشرده در واقع در نظر گرفتن یک ناحیه (بالن) محتوی هوای فشرده با فشار بالا است که البته این ناحیه دارای حجم بیشتری نسبت به حجم ماده منفجره است. این روش اولین بار توسط برود [15] ارائه شد. او پیشنهاد کرد که به جای ماده منفجره جامد از یک بالن با فشار بالا استفاده شود. در این مدل بخشی از انرژی پتانسیل انفجار بالن به انرژی جنبشی اجزاء بالن تبدیل شده و مابقی انرژی غیرموثر باقی می‌ماند(مثل انرژی کششی به شکل حرارت در اجزاء بالن). در واقع چون انفجار بالن یک پدیده فیزیکی است، فرآیندهای انفجارهای شیمیایی مثل تراک و برهمکنش گازهای انفجار، در این پدیده وجود نخواهند داشت [16]. در واقع روش بالن فشرده یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های شبیه‌سازی انفجار با استفاده از روش عددی حجم محدود است که امکان پیش‌بینی انرژی پتانسیل انفجار را با فاصله‌ای معدل شعاع بالن فشرده نسبت به محل انفجار فراهم می‌آورد [17].

برای انجام شبیه‌سازی عددی موج بلست با روش بالن فشرده، باید چند عامل مهم این روش محاسبه شود. اولین عامل، فشار اولیه داخل بالن است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{\text{init}} = E_{\text{TNT}}(\gamma - 1) + P_0 \qquad (13)$$

در این رابطه E_{TNT} مقدار کل انرژی اولیه ماده منفجره، P_0 فشار اتمسفر و γ نسبت گرمای ویژه گاز داخل بالن است. در بسیاری از منابع، معمولاً مقدار انرژی ماده منفجره براساس میزان جرم معادل TNT بیان می‌شود. این مقدار انرژی با توجه به انرژی آزاد شده در اثر انفجار یک کیلوگرم TNT به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{\text{TNT}} = M_{\text{TNT}} \times 4.52 \times 10^6 \qquad (14)$$

در این رابطه E_{TNT} برحسب J/kg و M_{TNT} برحسب kg می‌باشد. در صورتی که ماده‌ی منفجره‌ی دیگری غیر از TNT مدنظر باشد، ابتدا باید معادل TNT آن مشخص شده و از روابط بالا فشار معادل انفجار برای بالن فشرده و شعاع بالن مشخص گردد. در نتیجه با استفاده از روابط بیان شده، برای مسئله حاضر فشار داخل بالن حاوی هوای فشرده‌ی معادل 0.481 کیلوگرم TNT برابر 30,000 کیلوپاسکال و شعاع این بالن برابر 23 سانتی متر به‌دست می‌آید.

3- ارزیابی نتایج

3-1- بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه محاسباتی

شبکه‌بندی مناسب هندسه‌ی مسئله به‌عنوان بخشی از فرآیند حل CFD موجب افزایش دقت نتایج حل عددی شده و یکی از منابع خطای محاسباتی را از بین می‌برد. شبکه‌بندی درشت بر روی صحت نتایج شبیه‌سازی تاثیر گذاشته و در نقطه‌ی مقابل در صورتی که شبکه‌بندی مسئله خیلی ریز شود، هزینه‌ی محاسباتی موردنیاز برای حل مسئله افزایش خواهد یافت که این موضوع به هیچ‌وجه مطلوب نیست. در نتیجه حداکثر اندازه‌ی شبکه محاسباتی که نتایج شبیه‌سازی عددی را تحت تأثیر قرار ندهد، به‌عنوان اندازه شبکه بهینه شناخته می‌شود. در این تحقیق به‌منظور بررسی وابستگی همگرایی به اندازه شبکه محاسباتی، از شاخصی به نام (GCI[1]) استفاده شده است [18]. در صورتی که حداکثر فشار فاز مثبت را P_s ، مقدار آن را برای گیجی مشابه در یک شبکه‌بندی ریز P_{s1} و برای شبکه‌بندی درشت‌تر P_{s2} درنظر گرفته شود، شاخص GCI از رابطه‌ی (15) محاسبه خواهد شد:

$$GCI_{21} = 3\varepsilon_{21}/(r_2 - 1) \qquad (15)$$

که در این معادله r عامل بهبود شبکه نام داشته و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید :

$$r = \Delta X_2 / \Delta X_1 \qquad (16)$$

در رابطه‌ی بیان شده، ΔX اندازه‌ی فاصله‌ی بین دو گره در شبکه‌بندی است. زیرنویس 1 مربوط به شبکه‌بندی درشت‌تر و 2 مربوط به شبکه‌بندی ریزتر است. همچنین ε_{21} درصد خطای نسبی بین دو جواب فشار در یک نقطه (سنجه) بوده و از رابطه ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_{21} = 100(P_{S2} - P_{S1})/P_{S1} \qquad (17)$$

حداکثر مقدار قابل قبول برای عامل GCI 5% است [18]. در شبیه‌سازی انجام شده در این تحقیق و با کمک نرم‌افزار اپن‌فوم، هندسه‌ی مسئله‌ی در آزمایش یک با شبکه‌بندی‌هایی با اندازه‌ی ΔX برابر 0.01، 0.02 و 0.03 متر برای مرزهای هندسه، مورد بررسی قرار گرفته و شبیه‌سازی عددی مسئله انجام شده است. درنهایت نتایج مربوط به دو گیج مورد بررسی در (جدول 2) آورده شده است. در این جدول مقادیر بشینه‌ی فشار برای گیج‌های مختلف در سه شبیه‌سازی با اندازه‌ی شبکه متفاوت در سه ستون به صورت Ps_1، Ps_2 و Ps_3 نمایش داده شده است. همچنین مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار آزمایش سه و دو با عامل GCI_{32} و مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار آزمایش یک و دو با عامل GCI_{21} در هر گیج مشخص است. اندازه‌ی شبکه‌بندی مربوط به هر آزمایش نیز در سطر آخر ستون مربوط به بیشینه‌ی فشار آن آورده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در (جدول 2) مشاهده می‌شود که عامل GCI_{32} (مقایسه‌ی بیشینه فشار آزمایش سه و دو) برای تمامی گیج‌های این آزمایش دارای مقداری کمتر از 5% است.

در نتیجه می‌توان چنین نتیجه گرفت که شبکه‌بندی با ΔX برابر 0.02 متر، شبکه‌بندی بهینه برای انجام شبیه‌سازی عددی است. درنتیجه کلیه‌ی شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در تحقیق حاضر با شبکه با اندازه‌ی ΔX برابر 0.02 متر برای مرزهای مسئله می‌باشد. بدیهی است که در مقایسه‌ی

[1] Grid convergence index

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

شبکه‌بندی آزمایش‌های یک و دو، مقدار عامل GCI_{21} کمتر از GCI_{32} است. اما به دلیل افزایش هزینه‌ی محاسباتی، استفاده از شبکه‌بندی با اندازه‌ی ΔX برابر 0.01 متر مناسب نیست.

3-2- اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایش تجربی

به‌منظور بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی انجام شده با روش عددی حجم محدود، مدل انفجار بالن فشرده و نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم، نتایج انفجار در یک محیط بدون مانع با نتایج آزمایش تجربی انجام شده توسط کتلین و همکارانش [18] مقایسه شده است. مشخصات حل عددی دقیقاً مطابق با شرایط بیان شده، اما در هندسه‌ی بدون مانع می‌باشد. در آزمایش میدانی انجام شده توسط کتلین و همکارانش [18]، 320 گرم ماده منفجره PE4 با معادل TNT حدود 1.3 مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر فشار در این آزمایش با استفاده از گیج‌های پیزوالکتریک اندازه‌گیری شده است.

شبیه‌سازی عددی انفجار در هندسه‌ای با ابعاد 20×10 متر و با استفاده از حدود 2 میلیون شبکه محاسباتی مربعی و ساختار یافته انجام شده است. برای شبیه‌سازی انفجار از مدل بالن فشرده استفاده شده است. همچنین فشار داخل بالن حاوی هوای فشرده‌ی معادل 0.481 کیلوگرم TNT برابر 30,000 کیلوپاسکال و شعاع این بالن برابر 23 سانتی‌متر محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایش تجربی کتلین و همکارانش [18] در (جدول 3) آمده است.

نتایج (جدول 3) نشان می‌دهد که مشخصات شبیه‌سازی مورد استفاده در تحقیق حاضر، با حداکثر خطای نسبی کمتر از 12% دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عددی پدیده‌ی انفجار دارد. خطای موجود بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایش تجربی منابع مختلفی دارد که از جمله می‌توان به عدم استفاده از معادلات حالت مخصوص انفجار به جای معادله‌ی حالت گاز کامل برای گازهای انفجار، از جمله مواردی است که باعث ایجاد اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایش تجربی شده است. اما صرف نظر از نواقص موجود برای روش عددی استفاده شده، با توجه به نتایج بدست آمده و قابل مشاهده در (جدول 3)، می‌توان روش عددی موجود را روشی قابل اعتماد برای شبیه‌سازی عددی موج بلست دانست.

3-3- بررسی نتایج برهمکنش موج بلست با موانع سایبان با زوایای خمیدگی مختلف

با توجه به اینکه در هندسه‌ی سایبان زاویه‌ی خمیدگی نقطه‌ی تمایز و محل بحث می‌باشد، شبیه‌سازی با چهار زاویه‌ی صفر، 22.5، 45 و 67.5 درجه انجام شده است. ارتفاع کلی مانع در هر چهار آزمایش یکسان و برابر 1 متر بوده و تنها تفاوت چهار هندسه‌ی مورد بررسی، زاویه‌ی قسمت خمیده سایبان می‌باشد. محل شروع انفجار و فاصله‌ی آن تا موانع نیز در چهار آزمایش یکسان و برابر 2 متر انتخاب شده است. در (شکل 2) مقادیر فشار ثبت شده در ارتفاع 1.2 متری و در فاصله‌ی 2 متری پشت مانع برای 4 مانع سایبان با زوایای خمیدگی مختلف و دیوار کاملاً عمودی آورده شده است. با توجه به این نتایج، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین فشار پشت مانع کاملاً عمودی و موانع سایبان به خوبی قابل مشاهده است.

برگر و همکارانش[11] برای بررسی دقیق‌تر میزان میرایی موج بلست، پس از برخورد با موانع با ویژگی‌های مختلف، پارامتری را تحت عنوان عامل میرایی معرفی می‌کنند که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Attenuation factor} = \text{Over Pressure after interaction} / \text{OverPressure before interaction} \quad (18)$$

برای محاسبه عامل میرایی برای تحقیق حاضر، فشار مسئله در دو نقطه با ارتفاع یکسان 0.3 متر و به فاصله 1 متر قبل و بعد از مانع مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. با توجه به رابطه (18) می‌توان چنین گفت که هرچه مقدار عامل میرایی کمتر باشد، عملکرد مانع مقابل آن مناسب‌تر بوده است. همچنین بیشتر بودن درصد اختلاف نسبی فشار قبل و بعد از مانع نیز نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب‌تر مانع است. در نتیجه مقدار عامل میرایی برای مانع سایبان با 4 زاویه خمیدگی و برای دیوار کاملاً عمودی محاسبه شده و نتایج آن به همراه درصد اختلاف نسبی فشار قبل و بعد از مانع در (جدول 4) آمده است. نتایج آورده شده در این جدول نیز تایید کننده‌ی تاثیر مثبت استفاده از مانع سایبان در مقابل استفاده از مانع کاملاً عمودی است. لذا همان‌طور که در (جدول 4) مشخص است، استفاده از مانع سایبان در مقایسه با مانع کاملاً عمودی حداکثر 14% میزان میرایی موج بلست را افزایش داده است. علاوه بر این در این جدول به خوبی مشخص است که با افزایش زاویه قسمت خمیده سایبان از 0 درجه تا حدود 67.5 درجه، میزان میرایی موج بلست به تدریج تا حدود 4% افزایش داشته است.

در (شکل 3) مربوط به نمودار فشار– زمان موج بلست برای موانع سایبان با چهار زاویه مختلف خمیدگی نیز به خوبی کاهش تدریجی فشار موج بلست با افزایش زاویه خمیدگی مانع سایبان تا زاویه‌ی 67.5 درجه مشخص شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در (جدول 4)، مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه سایبان از 0 تا 67.5 درجه به تدریج میزان میرایی موج بلست و کارایی مانع افزایش یافته است. از طرف دیگر مانع کاملاً عمودی (زاویه 90

جدول 2 مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با اندازه شبکه بندی‌های متفاوت

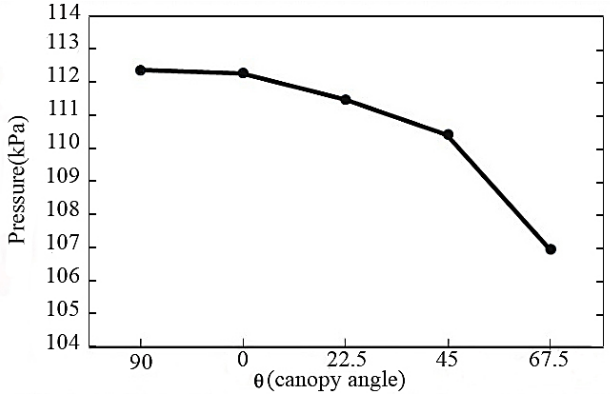
Table 2 Comparison of the simulation results with different mesh sizes

فاصله تا محل انفجار (m)	Ps_1(Pa)	Ps_2(Pa)	Ps_3(Pa)	GCI_{21}	GCI_{32}
2.9	119330.6	120312.5	122073.7	0.82%	%1.44
4.7	113072.4	113552.2	114379.5	%0.42	%0.72
ΔX (m)	0.01	0.02	0.03	-	-

جدول 3 مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی

Table 3 Comparison between Simulation and experimental results [14]

فاصله تا محل انفجار (m)	فشار نتایج آزمایش تجربی (Pa)	فشار شبیه سازی عددی (Pa)	درصد خطای نسبی
4.7	728000	794700	%9.16
7.7	381800	443400	%11.30



شکل 2 بیشینه فشار موج بلست در ارتفاع 1.2 متر پشت مانع

Fig. 2 The blast wave peak pressure in 1.2m height behind the wall

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

جدول 4 عامل میرایی و درصد اختلاف نسبی فشار قبل و بعد از موانع

Table 4 Attenuation factor and the percent relative difference behind and in front of the obstacle

زاویه خمیدگی مانع	درصد اختلاف نسبی فشار قبل و بعد از مانع	عامل میرایی
0 درجه	%45.28	0.547
22.5 درجه	%46.67	0.533
45 درجه	%47.14	0.528
67.5 درجه	%49.23	0.508
عمودی	%35.76	0.642

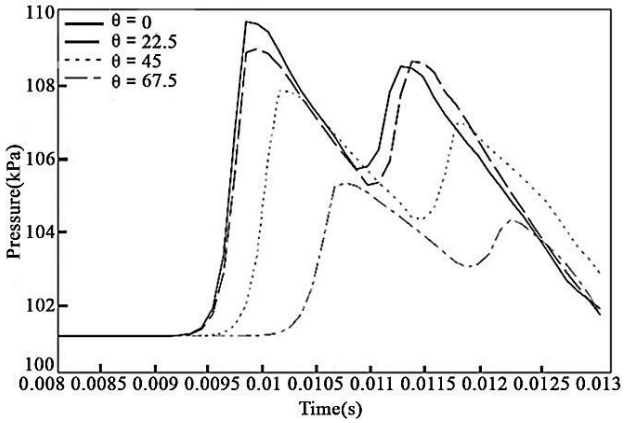


Fig. 3 Pressure-time chart for canopy wall in four different curvature angle, in a point with 0.6m height and 2m distance from the wall

شکل 3 نمودار فشار – زمان برای موانع سایبان با چهار زاویه مختلف خمیدگی، در نقطه‌ای به ارتفاع 0.6 متر و در فاصله‌ی 2 متری پشت دیوار

درجه) نتیجه مطلوبی نداشته و لذا زاویه بهینه برای میزان خمیدگی مانع بین 67.5 و 90 درجه مشخص نیست. در نتیجه شبیه‌سازی با سه زاویه دیگر با گام 5.5 درجه بین 67.5 و 90 درجه بار دیگر انجام شده است. مقدار عامل میرایی برای سه زاویه خمیدگی جدید و زوایای خمیدگی قبلی در نمودار (شکل 4) آورده شده است.

همان‌طور که در نمودار (شکل 4) مشخص است، در زوایای بزرگتر از 67.5 درجه عامل میرایی افزایش یافته است بعد از زاویه 73 درجه شیب این افزایش بیشتر شده و در زاویه 90 درجه مقدار عامل میرایی به بیشترین مقدار خود رسیده است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، هرچه مقدار عامل میرایی کمتر باشد، مانع عملکرد بهتری برای میرایی موج بلست داشته است. با توجه به نتایج نمودار (شکل 4) می‌توان چنین نتیجه گرفت که زاویه خمیدگی با کمترین مقدار عامل میرایی قطعاً مقداری بین 67.5 و 73 درجه خواهد داشت و بنابراین مناسب‌ترین زاویه خمیدگی برای مانع سایبان در این بازه خواهد بود.

پس از برخورد جبهه‌ی موج بلست با هر یک از موانع بخشی از آن به صورت انعکاس یافته از مانع بازگشته و بخشی دیگر از مانع عبور می‌کند. در مانع با زاویه‌ی صفر درجه و 22.5 درجه، موج انعکاسی برگشتی از مانع شکلی تقریبا عمودی (تخت) دارد. اما در موانع با زاویه‌ی انحنای بیشتر، یعنی 45 و 67.5 درجه، این موج برگشتی به دو قسمت تقسیم شده است. بخشی از آن که با قسمت عمودی مانع برخورد می‌کند، عمودی انعکاس یافته اما بخشی که با قسمت خمیده برخورد می‌کند، با زاویه به سمت زمین برمی‌گردد. این انعکاس مایل موج از مانع سایبان، موجب متمرکز شدن موج بلست انعکاس

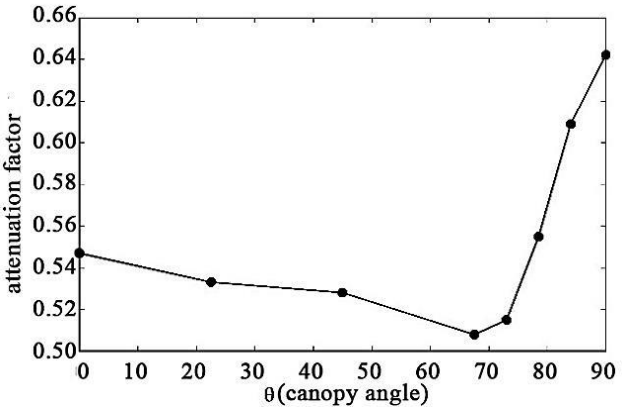


Fig. 4 Attenuation factor-canopy curvature angle chart for canopy wall in eight different curvature angles, in a point with 0.6m height and 2m distance from the wall

شکل 4 نمودار عامل میرایی – زاویه خمیدگی برای موانع سایبان با هشت زاویه مختلف خمیدگی، در نقطه‌ای به ارتفاع 0.6 متر و در فاصله‌ی 2 متری پشت دیوار

یافته در یک نقطه‌ی امن در قسمت سمت چپ دیوار شده و بخشی از کارکردی است که برای طراحی این نوع موانع مدنظر قرار می‌گیرد.

اما قسمت مهم‌تر موج بلست برخوردکرده با مانع، آن بخشی است که می‌خواهد از مانع عبور کند. در مطالعات انجام‌گرفته در این حوزه از فشار این قسمت با عنوان "فشار نشتی[1]" نام می‌برند [1]. در (شکل 4) نمودار تغییرات فشار در راستای محور x برای مانع سایبان با زاویه خمیدگی 45 درجه، قبل و اندکی پس از برخورد با مانع، در نقطه‌ای با ارتفاع نزدیک به ناحیه نوک تیز قسمت خمیده مانع سایبان و در دو گام زمانی متفاوت آورده شده است. در ناحیه نوک تیز قسمت خمیده مانع سایبان، به‌علت شکل خاص هندسی‌ای که دارند افزایش ناگهانی فشار و سرعت ایجاد می‌شود. در نتیجه مقدار قابل توجهی از فشار و سرعت موج بلست در این نقطه تلف شده و همین موضوع عاملی برای افزایش میرایی موج بلست عبوری از مانع است. همان‌طور که در نمودار (شکل 4) مشخص است، بیشینه فشار موج بلست قبل از برخورد با مانع در حدود 170 کیلوپاسکل است. در حالی که همین موج پس از برخورد با مانع سایبان و در زمانی کمتر از 0.3 میلی ثانیه مقدار بیشینه فشارش تا حدود 132 کیلوپاسکال کاهش یافته است. این در حالی است که بیشینه فشار موج بلست انعکاس یافته در نزدیکی ناحیه نوک تیز بالای مانع دارای بیشینه

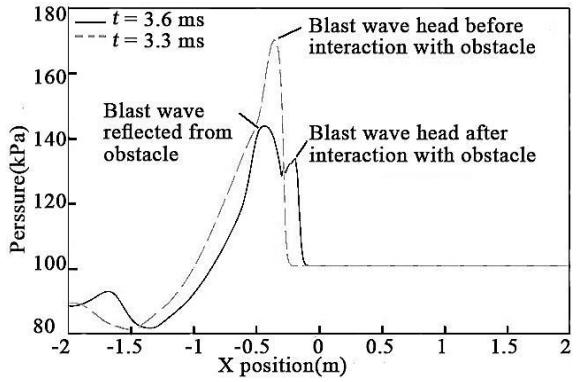


Fig. 5 The pressure-X distance chart for the 45° curvature angle canopy wall, in a point with 1.03m height and 3.3ms time step

شکل 5 نمودار تغییرات فشار در راستای X برای مانع سایبان با زاویه خمیدگی 45 درجه، در نقطه‌ای به ارتفاع 1.2 متر و در گام زمانی 3.3 میلی ثانیه

[1] Leakage pressure

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

فشاری در حدود 145 کیلوپاسکال است. در نتیجه ناحیه نوک تیز قسمت خمیده مانع سایبان با انعکاس بخش قابل توجهی از موج بلست به سمت منبع انفجار، نقش مهمی در کاهش فشار و سرعت موج بلست داشته و به افزایش میرایی این موج کمک مؤثری کرده است.

3-4- بررسی اثر حضور گرابه‌های جریان آشفته در اطراف مانع

با توجه به استفاده از مدل آشفتگی LES در شبیه‌سازی انجام شده، امکان بررسی دقیق‌تر فرآیندهای جریان آشفته و حضور گردابه‌ها به‌وجود آمده است. پروفیل سرعت موج بلست به منظور شناسایی گردابه‌های جریان آشفته برای یک مانع سایبان و یک مانع کاملاً عمودی به‌دست آمده و در دو زمان مختلف در (شکل 6) آورده شده است.

در این شکل حضور گردابه در قسمت نوک تیز مانع سایبان به خوبی مشخص است، درحالی که در اطراف مانع کاملاً عمودی در گام زمانی مشابه، تنها در برخی نقاط گردابه‌های بسیار کوچک و کم‌اثر مشاهده می‌شود. گردابه‌ها شکل خاصی از جریان هستند و همان‌طور که از اسم آن‌ها مشخص است، در نقاط خاصی از جریان ایجاد شده و موجب چرخش جریان سیال حول یک مرکز می‌شوند. در نتیجه حضور گردابه‌ها در جریان آشفته موجب اتلاف انرژی جریان شده و از شدت آن می‌کاهد [19]. جریان موج بلست نیز به هنگام برخورد با مانع آشفته شده و از شدت آن کاسته می‌شود. مانع سایبان با شکل هندسی خاص و نقاط نوک تیز شرایط را برای ایجاد گردابه-های بیشتر و موثرتر فراهم می‌نماید. در نتیجه با بررسی (شکل 6) و مشاهده گردابه‌های موثر در نواحی نزدیک مانع سایبان، می‌توان یکی از دلایل مهم افزایش میرایی موج بلست به هنگام برخورد با مانع سایبان را حضور این گردابه‌ها دانست. لذا گردابه‌های ایجاد شده در نزدیکی نقاط نوک تیز مانع سایبان با کاهش شدت جریان موج بلست، کارایی این نوع از موانع را افزایش می‌دهند. اما برای بررسی دقیق‌تر مکانیزم کاهش شدت موج بلست توسط گردابه‌ها، پروفایل سرعت برای هر چهار نوع مانع سایبان با زوایای خمیدگی متفاوت در (شکل 7) آورده شده است.

(شکل 7) گردابه‌های نزدیک موانع با زوایای خمیدگی مختلف را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، محل قرار گرفتن گردابه‌ها عمدتاً در نزدیکی نواحی نوک تیز قسمت خمیده‌ی مانع می‌باشد. این گردابه‌ها جریان موج بلست عبوری از مانع را تحت تاثیر قرار داده و میرایی آن را افزایش می‌دهند. اما تفاوت کوچک در محل قرار گرفتن گردابه-های نزدیک موانع با زوایای خمیدگی مختلف، موجب اندکی تفاوت در کارایی این موانع شده است. برای بررسی دقیق‌تر موضوع، نمودار موقعیت قرارگیری مراکز گردابه‌ها در راستای محور y در گام‌های زمانی مختلف در نمودار (شکل 8) آورده شده است.

گردابه‌های اطراف موانع، جریان موج بلست جانبی عبوری از اطراف مانع را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در نتیجه هرچه این گردابه‌ها بیشتر در معرض جریان موج بلست عبوری از اطراف مانع باشند، این جریان را بیشتر تحت تاثیر قرار داده و از شدت آن بیشتر می‌کاهند. در نمودار (شکل 8) به خوبی مشخص است که با افزایش زاویه خمیدگی مانع، محل قرار گرفتن مراکز گردابه‌های اطراف مانع دچار تغییراتی شده است. با گذشت زمان، به تدریج این گردابه‌ها از نزدیکی مانع فاصله گرفته و بیشتر در معرض جریان موج بلست عبوری از اطراف مانع قرار می‌گیرند. برای مانع سایبان با زاویه خمیدگی 67.5 درجه، موقعیت قرارگیری مراکز گردابه‌ها از ارتفاع حدود 1 متری تا

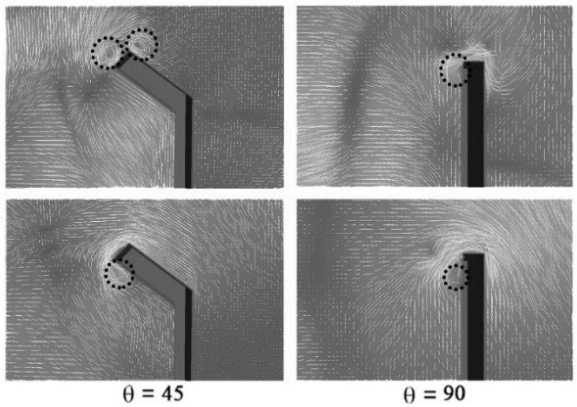


Fig. 6 The velocity profile for canopy and oblique wall in two time steps

شکل 6 پروفایل سرعت برای مانع سایبان و مانع کاملاً عمودی در دو گام زمانی

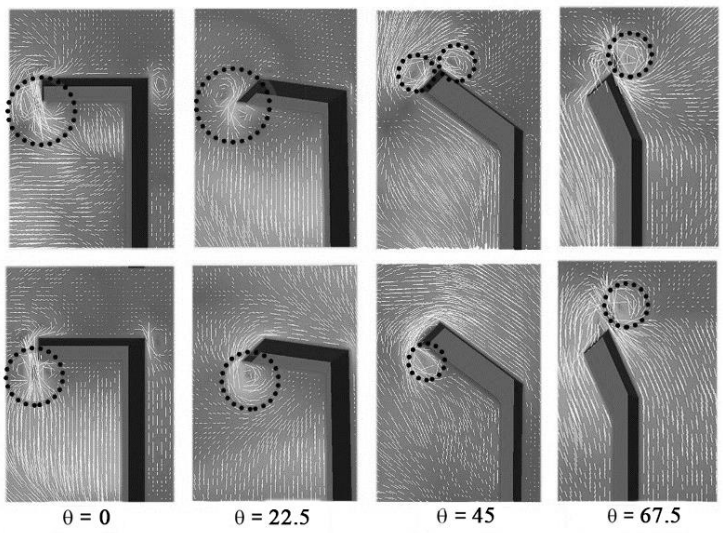


Fig. 7 The velocity profile for the four canopy walls with different curvature angles in three time steps

شکل 7 پروفایل سرعت برای چهار نوع مانع سایبان با زوایای خمیدگی مختلف در سه گام زمانی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

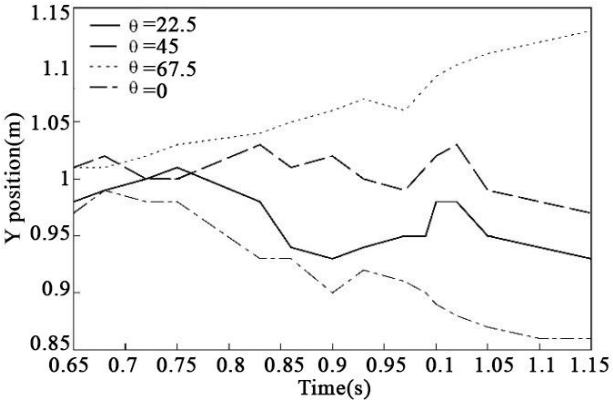


Fig. 8 The vorticity position in Y axis chart for the four canopy walls

شکل 8 نمودار موقعیت مراکز گردابه‌ها در راستای y ، برای چهار مانع سایبان

ارتفاع بیش از 1.1 متر افزایش می‌یابد. در نتیجه این گردابه‌ها بیشتر در معرض جریان موج بلست عبوری از بالای مانع قرار گرفته و آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. این در حالی است که ارتفاع قرارگیری مراکز گردابه‌ها برای موانع با زوایای خمیدگی کمتر، در نزدیکی قسمت بالای مانع متمرکز بوده و حتی پایین‌تر هم آمده است. در نتیجه از جریان جانبی موج بلست عبوری از بالای مانع فاصله گرفته و نمی‌توانند تاثیر زیادی بر آن داشته باشند. لذا همان‌طور که از نتایج (جدول 4) نیز مشخص است، بیشترین میزان میرایی موج بلست در میان موانع سایبان مربوط به مانع با زاویه خمیدگی 67.5 درجه می‌باشد.

4- نتیجه‌گیری

دیوارهای بلست به عنوان یکی از کاربردی‌ترین ابزارها برای کاهش شدت موج بلست انفجار در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دیوارها برای جلوگیری از آسیب‌رسانی به اهداف مهم در مقابل حملات تروریستی استفاده شده و طراحی بهینه آن‌ها یکی از چالش‌های مهم مهندسان حوزه‌ی انفجار محسوب می‌شود. تحقیق حاضر از منظر طراحی هندسی به این دیوارها پرداخته و به‌عنوان یک مطالعه موردی، دیوارهای بلست با هندسه‌ی سایبان را مورد بررسی قرار داده است. در دیوارهای بلست با هندسه‌ی سایبان نیز، مقایسه‌ی میرایی موج بلست پس از برخورد با این موانع در مقایسه با موانع کاملاً عمودی واکاوی شده است. با توجه به هزینه بالا و خطرات روش‌های تجربی، شبیه‌سازی عددی به‌عنوان روش انجام تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی حجم محدود و نرم‌افزار متن باز اپن‌فوم انجام شده و نتایج شبیه‌سازی انفجار در محیط بدون مانع با نتایج یک آزمایش تجربی اعتبارسنجی شده است. استفاده از مدل‌سازی آشفتگی با مدل دقیق LES نیز امکان شبیه‌سازی حضور گردابه‌های جریان آشفته در جریان موج بلست را فراهم آورده است تا اثر حضور این گردابه‌ها در اطراف موانع بر نتایج شبیه‌سازی عددی بررسی شود. همچنین حضور گردابه‌ها در اطراف مانع به تحلیل دقیق‌تر نحوه‌ی برهمکنش موج بلست با مانع کمک کرده است. درنهایت شبیه‌سازی برهمکنش موج بلست با مانع سایبان، برای چهار زاویه خمیدگی 0، 22.5، 45 و 67.5 درجه انجام شده و نتایج به‌دست آمده با نتایج شبیه‌سازی انفجار مقابل مانع کاملاً عمودی مقایسه شده است. پس از مقایسه نتایج برای این چهار زاویه مشخص گردید که با افزایش زوایه‌ی خمیدگی مانع به تدریج میزان میرایی موج بلست تا حدود 4% افزایش یافته است. این موضوع با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی انجام شده در گذشته نیز تطابق دارد. همچنین بررسی نمودار تغییر زاویه خمیدگی در مقابل عامل میرایی نشان می‌دهد که مناسب‌ترین زاویه خمیدگی مانع سایبان با کمترین مقدار عامل میرایی، قطعاً مقداری بین 67.5 و 73 درجه خواهد داشت. بررسی دقیق‌تر گردابه‌های اطراف مانع برای این چهار زاویه‌ی خمیدگی نشان می‌دهد که با افزایش زاویه خمیدگی، مراکز گردابه‌های اطراف مانع از آن‌ها فاصله گرفته و با بیشتر تحت تأثیر قرار دادن جریان موج بلست عبوری موجب افزایش میرایی آن شده است. این تحلیل به واسطه‌ی استفاده از مدل آشفتگی LES در این تحقیق حاصل شده و می‌تواند در طراحی دیوارهای بلست با هندسه‌ی سایبان برای افزایش کارایی این نوع دیوارها مورد استفاده قرار گیرد.

5- فهرست علایم

alpha	متغیر واسطه در مدل یک- شبکه
E	انرژی کل (Nm)
epsilon	اتلاف انرژی
G	تابع فیلتر کرنل
GCI	شاخص همگرایی شبکه
h	آنتالپی (Nm)
k	انرژی جنبشی (Nm)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
S	تانسور تنش ویسکوز ($kgm^{-1}s^{-2}$)
T	دما (K)
U	سرعت (ms^{-1})

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	تانسور تنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)
λ	پارامتر بی‌بعد
Δ	ثابت مدل یک- معادله
δ	تابع تغییرات
γ	نسبت گرمای ویژه
ε	درصد خطای نسبی بین دو مقدار فشار

زیرنویس‌ها

e	اتلاف انرژی
k	انرژی جنبشی انتقال داده شده از مقیاس زیرشبکه
SGS	مقیاس زیرشبکه
t	جریان آشفته
tot	کلی

6- مراجع

[1] P. Smith, Blast walls for structural protection against high explosive threats: A review, *International Journal of Protective Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-84, 2010.

[2] Y. Sugiyama, T. Homae, K. Wakabayashi, T. Matsumura, Y. Nakayama, Numerical simulations on the attenuation effect of a barrier material on a blast wave, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 32, No. 3, pp. 135-143, 2014.

[3] T. Ngo, N. Nguyen, P. Mendis, an Investigation on the effectiveness of blast wall and blast-structure interaction, *Proceeding of the 51th Conference on Development in Mechanics of Structures and Materials*, Perth: Elsevier, pp. 7-961, 2004.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]

[4] S. Sklavounos, F. Rigas, Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 17, No. 6, pp. 407-417, 2004.
[5] A. M. Remennikov, T. A. Rose, Predicting the effectiveness of blast wall barriers using neural networks, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 12, pp. 1907-1923, 2007.
[6] M. D. Goel, V. A. Matsagar, Blast-resistant design of structures, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 19, No. 2, pp. 4001-4007, 2013.
[7] R. Hajek, M. Foglar, J. Fladr, Influence of barrier material and barrier shape on blast wave mitigation, *Construction and Building Materials*, Vol. 120, No. 18, pp. 54-64, 2016.
[8] S. Sklavounos, F. Rigas, Simulation of Coyote series trials-Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions, *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, No. 5, pp. 1434-1443, 2006.
[9] X.-G. Li, U. Fritsching, Modeling and Simulation of Pressure-Gas-Atomization Process for Metal Powder Production, *Proceeding of the 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Bremen: Wiley, pp. 1-18, 2014.
[10] I. Asproulias, *RANS Modelling for Compressible Turbulent Flows Involving Shock Wave Boundary Layer Interactions*, Doctor of Philosophy Thesis, School of Mechanical Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2014.
[11] S. Berger, G. Ben-Dor, O. Sadot, Experimental and numerical investigations of shock-wave attenuation by geometrical means: A single barrier configuration, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 50, No. 9, pp. 60-70, 2015.
[12] M. Chapuis, C. Fureby, E. Fedina, N. Alin, J. Tegnér, Les modeling of combustion applications using OpenFOAM, *Proceeding of the 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics*, pp. 14-17, Lisbon: Springer, 2010.
[13] O. Penttinen, E. Yasari, H. Nilsson, A pimplefoam tutorial for channel flow, with respect to different LES models, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 23, No. 2, pp. 1-23, 2011.
[14] C.J. Greenshields, *OpenFOAM user guide*, pp. 823-911, London: OpenFOAM Foundation Ltd., 2011.
[15] H. L. Brode, numerical simulation of spherical blast wave, *Applied Physic s*, pp. 766-777, Vol. 26, No. 6, 1955.
[16] D. A. Crowl, *Understanding Explosions*, pp. 65-171, New York: CCPS, 2003.
[17] M. Larchera, F. Casadeia, Explosions in complex geometries-a comparison of several approaches, *Protective Structures*, Vol. 1, No. 8, pp. 169-195, 2010.
[18] M. I. C Catlin, S Myatt, D. C. D Ingram, L Qian, *A Study of the feasibility and benefits of extending current HSE methodology to take account of blast sheltering*, Vol. 1, Explosion Hazard Assessment, USA, pp. 20-120, 2001.
[19] A. Agrawal, A. Prasad, Properties of vortices in the self-similar turbulent jet, *Journal of Experiments in Fluids*, Vol. 33, No. 4, pp. 565-577, 2002.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.3.26.0]