



Computational Fluid Dynamics Simulation of Blast Wave Using OpenFOAM: the Effect of Solver and Equation of State on the Results Accuracy

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Noorpoor Z.¹,
Tavangar S.¹,
Soury H.²,
Hosseini S. G.³,

How to cite this article

Noorpoor Z, Tavangar S, Soury H, Hosseini S. G. Experimental and Numerical Analysis of a Propeller Downstream Flow at Static Conditions and Determination of Semi-Empirical Equations. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(12):747-757.

ABSTRACT

Numerical methods, as one of the subcategories of theoretical models, can predict the behavior of energetic materials with appropriate accuracy and away from experimental test limitations. In this investigation, a computational fluid dynamics tool has been used to predict blast wave propagation considering geometrical obstacles. Two solvers (extendedSonicFoam and blastFoam) from the open-source technology module, OpenFOAM have been used for simulations, and a large eddy simulation method was employed for turbulence modeling to enhance confirmation with reality. In addition to the ideal gas equation of state (EOS), the BKW EOS, a complete EOS with an explicit temperature dependence, has been used to correlate the various thermodynamic parameters. Several gauges were positioned to record the pressure-time signals, and the experimental data reported in the resources were used for validation. It should be noted that the maximum error of simulations was 12.29% for different blast wave parameters. Deviation from standard for ideal gas numerical results was greater than that of real gas assumption, and blastFoam solver has been predicted maximum positive phase overpressure, arrival time and positive phase impulse, which are the important parameters of the blast wave, with less error in comparison to extendedSonicFoam solver.

Keywords OpenFOAM, Computational fluid dynamics, Equation of state, Blast, Solver.

CITATION LINKS

1- Prediction of vapour cloud explosions 2- Advanced CFD and modeling of accidental explosions. 3- Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part 4- A shock tube technique for blast wave 5- Validation of turbulence models in heavy gas 6- Experimentally validated 3-D simulation of 7- Computer simulation of shock waves 8- Simulating geometrically complex blast scenarios. 9- Numerical Modeling of Damage Caused by 10- Numerical simulation of far-field blast loads arising from 11- A Computational Fluid Dynamics approach for air blast propagation using 12- Review on modeling and simulation of blast furnace. 13- Numerical simulations on the attenuation effect of 14- blastFoam 6.0 User Guide. *Synthetic Applied Technologies*. 15- Employment of the Open-source Airblast Solver blastFoam to Support the 16- Validation of Open-source Airblast Solver 17- A New OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with 18- A New OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with 19- Effect of Using of Real-Gas Equation of State on Simulation of 20- A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. 21- Reparametrization of the BKW equation of state for CHNO explosives which 22- Detonation properties of condensed explosives computed using the Becker-Kistiakowsky-Wilson equation of state. 23- Explosion Hazard Assessment: A Study of the Feasibility and Benefits of 24- Numerical simulation on the interaction of blast waves with a series of aluminum cylinders at near-field. 25- Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. 26- Study of the effect of covolumes in BKW equation of state on detonation properties of CHNO explosives. 27- Numerical prediction of steady-state detonation properties of condensed-phase explosives.

¹ Chemical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

² Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

³ Inorganic Chemistry, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Malek Ashtar University of Technology, Lavizan, Babaei Hwy, Shabanlou, Tehran.
stavangar@mut.ac.ir

Article History

Received: April 25, 2022

Accepted: September 09, 2022

ePublished: December 13, 2022

شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی موج انفجار در نرم‌افزار اپن فوم: بررسی اثر حلگر و معادله حالت بر دقت نتایج

زینب نورپور^۱، سعید توانگر روستا^{۱*}، حسین سوری^۱، سید قربان حسینی^۱
^۱مجمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

روش‌های عددی به عنوان یکی از زیر شاخه‌های مدل‌های نظری می‌توانند رفتار مواد پرانرژی را با دقت مناسب و به دور از محدودیت‌های آزمایشات تجربی پیش‌بینی نمایند. در این مطالعه، از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی برای پیش‌بینی عملکرد موج انفجار در حضور موانع هندسی استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها با دو حلگر توسعه‌یافته سونیک‌فوم (extendedSonicFoam) و بلست‌فوم (blastFoam) از ماژول تکنولوژی متن باز اپن‌فوم (OpenFOAM) انجام شده و برای افزایش دقت نتایج، از مدل آشفستگی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. علاوه بر معادله حالت گاز کامل، از معادله حالت نیمه تجربی بی-کا-دبلیو (BKW) که یک معادله حالت کامل است و وابستگی صریح به دما دارد برای ارتباط میان پارامترهای مختلف ترمودینامیکی استفاده شده است. برای ثبت سیگنال‌های فشار-زمان حسگرهای متعددی در بالا دست منفجره قرار گرفته و برای اعتبارسنجی نتایج نیز از داده‌های تجربی گزارش شده در منابع استفاده شده است. میزان خطا در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای پارامترهای مختلف موج انفجار حداکثر ۱۲٪/۲۹ بدست آمده است. میزان انحراف از استاندارد برای نتایج حل عددی با معادله حالت گاز کامل نسبت به گاز حقیقی بیشتر بوده و حلگر بلست‌فوم پارامترهای مهم ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت، زمان رسیدن موج و ایمپالس فاز مثبت را که از مشخصه‌های تعیین کننده موج انفجار می‌باشند را با خطای کمتری نسبت به حلگر توسعه یافته سونیک‌فوم پیش‌بینی کرده است.

کلیدواژه‌ها: اپن‌فوم، دینامیک سیالات محاسباتی، معادله حالت، انفجار، حلگر.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۸

*نویسنده مسئول: stavangar@mut.ac.ir

۱- مقدمه

عملکرد بلست و موج انفجار ترکیبات پرانرژی را می‌توان با استفاده از دو روش کلی آزمایش‌های میدانی و مدل‌های نظری پیش‌بینی نمود^[۱]. انجام آزمایش‌های میدانی انفجار علاوه بر خطرهای جانی، مستلزم صرف وقت و هزینه‌های بسیار زیاد است^[۲]. روش‌های عددی به عنوان یکی از زیر شاخه‌های مدل‌های نظری می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای بررسی رفتار مواد پرانرژی بشمار آید. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یک ابزار پر قدرت و توانا بدین منظور می‌باشد که می‌تواند برای تحلیل رفتار جریان سیال و پدیده‌های همراه آن در انواع سیستم‌های با هندسه ناموزون و معادلات پیچیده به کار گرفته شود^[۳].

روش‌های عددی به صورت متناوب برای توصیف پدیده انفجار مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعه اثر ایجاد یک مانع در چگونگی تغییرات موج بلست تاکنون توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است^[۴-۷]. در سال ۲۰۱۶ یک روش عددی انحصاری توسط کالیس و همکاران معرفی شد. آن‌ها یک موج بلست دو بعدی را شبیه‌سازی کردند و از روش معادل تی‌ان‌تی (Trinitrotoluene) برای اعمال انرژی انفجار استفاده نمودند^[۸]. انفجار گازی معادل با ۲۵۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در ارتفاع ۳ متر در مرکز یک تونل بتنی توسط کریمی تبار و همکاران در سال ۲۰۲۰ مدل‌سازی گردید^[۹]. آن‌ها در مطالعه خود از نرم‌افزار ایل‌اس‌داینا (LS-DYNA) برای حل معادلات کوپل جریان استفاده کردند. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۲۱، ژانگ و همکاران با استفاده از همین نرم‌افزار اثرات موج بلست بر سازه‌های شهری را با متد حجم کنترل و روش هم ارز تی‌ان‌تی مورد ارزیابی قرار داده و نتایج خود را با مقادیر تجربی اعتبار سنجی کردند^[۱۰]. نورپور و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ موج انفجار سه بعدی را به روش عددی در حضور موانع هندسی مورد ارزیابی قرار دادند^[۱۱]. آن‌ها در این مطالعه اثر استفاده از مدل توربولانسی را بررسی نموده و نتایج خود را با دو پنج مارک تجربی و عددی اعتبار سنجی کردند.

در مطالعه عددی رفتار مواد منفجره علاوه بر قوانین بقاء، وجود معادله حالت محصولات انفجار نیز ضروری است^[۱۲]. مطالعه سوگیاما^[۱۳] از محدود پژوهش‌هایی است که اثر معادله حالت را بر دقت نتایج مورد بررسی قرار داده است. وی در این تحقیق نشان داده است که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی موج بلست با استفاده از معادله حالت جی-دبلیو-ال (Jones-Wilkins-Lee) دقت نتایج را نسبت به معادله حالت گاز ایده‌آل افزایش می‌دهد. هیلمون و همکاران در سال ۲۰۱۸ برای اولین بار یک حلگر تخصصی دانسیته پایه به نام بلست‌فوم برای شبیه‌سازی عددی موج بلست ناشی از انفجار توسعه دادند که دارای قابلیت‌های مناسبی برای حل مسائل مربوط به این حوزه می‌باشد^[۱۴]. این حلگر علاوه بر معادله حالت گاز ایده‌آل، دوازده کتابخانه معادله حالت گاز حقیقی دارد و توانایی مدل‌سازی ترکیبات مختلف با تعداد فازهای متفاوت را دارا می‌باشد. تاکنون مطالعات عددی مختلفی با این حلگر انجام شده و نتایج قابل قبول در قیاس با داده‌های تجربی از آن گزارش شده است^[۱۵-۱۹].

در این مطالعه، موج انفجار در حضور موانع هندسی با تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار منبع-باز اپن-فوم که با روش حجم محدود بسط داده شده مدل‌سازی شده است. برای مطالعات عددی از دو حلگر توسعه داده شده فشار پایه سونیک‌فوم و حلگر نوظهور دانسیته پایه بلست‌فوم استفاده شده و برای افزایش دقت نتایج، از مدل آشفستگی شبیه‌سازی

$$\tau_{ij} = -2\mu_{SGS}\tilde{S}_{ij} + \frac{2}{3}\delta_{ij}\rho k \quad (6)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}\right) \quad (7)$$

لزجت گردابه در این مدل از انرژی جنبشی زیرشبکه مطابق رابطه (۸) حاصل می‌شود.

$$\mu_{SGS} = C_v \bar{\rho} k^{1/2} \Delta \quad (8)$$

C_e در رابطه (۵) و C_v در رابطه (۸) ثوابت مدل هستند [20].

به منظور ایجاد ارتباط بین پارامترهای ترمودینامیکی از معادله حالت استفاده شده است. در این مطالعه از دو معادله حالت گاز ایده آل، و بی-کا-دبلیو استفاده شده است. معادله حالت گاز ایده آل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \rho RT \quad (9)$$

که در آن R ثابت گاز است. در بسیاری از کاربردهای مهندسی و صنعتی معادله حالت گاز ایده آل پاسخگوی نیاز شبیه‌سازی بوده و از دقت نسبی خوبی برخوردار است. اما در برخی مسائل فیزیکی این معادله با توجه به فرض استقلال مولکول‌ها از یکدیگر توانایی پیش‌بینی دقیق پدیده‌های فیزیکی را ندارد. یکی از معادلاتی که رفتار گازهای حقیقی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی میکند، معادله حالت بی-کا-دبلیو است و مطابق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$\frac{PV_g}{RT} = 1 + (X e^{\beta X}) = F(X) \quad (10)$$

در معادله (۱۰) پارامترهای X و K مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف می‌شوند:

$$X = \frac{\kappa K}{V_g(T + \theta)^\alpha} \quad (11)$$

$$K = \sum (x_i \kappa_i) \quad (12)$$

در دو رابطه فوق، β, α, κ و θ ثوابت تجربی می‌باشند. V_g حجم مولی فاز گازی، κ_i و x_i هم به ترتیب کسر تناظر حجمی و کسر مولی مؤلفه گازی i ام هستند [21, 22].

۲-۲- شرایط مرزی و اولیه

در شبیه‌سازی‌های انجام شده، یک شرط مرزی غیرانعکاسی در مرزهای جانبی و مرز بالا برای فشار اختصاص داده شده است. شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌های جامد و شرط مرزی لغزش برای مرز بالا در نظر گرفته شده است. برای تمامی کمیت‌های آشفتگی، شرط مرزی نیومان (مقدار مرز معادل مقدار سلول داخلی در نظر گرفته می‌شود) برای مرزهای جانبی اعمال شده است. شرط دیریشله (مقدار روی مرز به شکل صریح اعمال می‌شود) با مقدار صفر بر روی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است که شامل زمین و سه بلوک جامد می‌باشد. برای متغیر دما، شرط مرزی نیومان بر روی دیواره‌ها اعمال شده و برای مرزهای جانبی و بالا نیز از شرط اینلت-اوتلت (inletOutlet) استفاده شده که یک نوع شرط نیومان اصلاح شده است. این شرط مرزی در هنگام خروج جریان از مرز به شکل نیومان عمل می‌کند در حالی

گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. ابتدا اثر استفاده از معادله حالت گاز حقیقی و گاز ایده‌آل بر دقت نتایج با استفاده از حلگر فشار پایه بررسی شده و نتایج حل عددی با داده‌های تجربی اعتبار سنجی شده است. سپس اثر استفاده از نوع حلگر بر دقت نتایج بررسی و صحت‌سنجی شده است. در بخش پایانی مقاله نیز سایر نتایج کمی و کیفی حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات مربوط به جریان تراکم پذیر، سه بعدی، مغشوش و غیر پایای گاز حاصل از انفجار ماده منفجره جامد شامل سه دسته معادلات است. معادلات دسته اول معادلات متداول حاکم بر جریان سیال است که شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot R_{eff} = -\nabla p \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U e) + \frac{\partial \rho K}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) + \nabla \cdot (U p) = -\nabla q + S \quad (3)$$

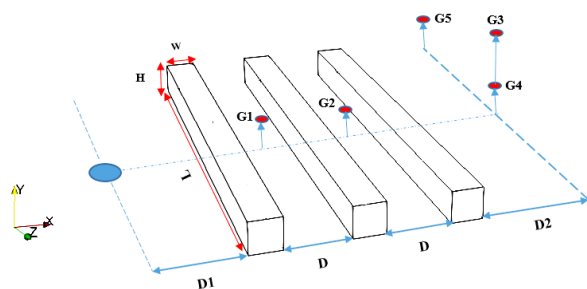
در رابطه (۱) ρ و U به ترتیب چگالی سیال و سرعت هستند. t بیانگر زمان و ∇ بیانگر عملگر دیوژانش است. در رابطه (۲)، p معرف فشار است. همچنین R_{eff} (رابطه (۴)) به تنسور تنش مؤثر اشاره دارد که شامل سهم هر دو بخش آرام و آشفته می‌شود.

$$R_{eff} = 2\mu_{eff}(D) - \frac{2}{3}\mu_{eff}(\nabla \cdot U)I. \quad (4)$$

در رابطه (۴)، μ_{eff} مجموع لزجت دینامیکی آرام و آشفته است. لزجت آشفته (μ_t) بیانگر سهم آشفتگی است که به صورت نوعی در جریان‌های با سرعت بالا رخ می‌دهد. همچنین D بخش متقارن از تنسور گرادیان سرعت است و I نشانگر تنسور واحد می‌باشد. در رابطه (۳) نیز q و K به ترتیب انرژی درونی، شار حرارتی و انرژی جنبشی سیال هستند. دمای جریان از طریق معادله انرژی و برقراری رابطه $e = C_v T$ استخراج می‌شود که در این رابطه C_v گرمای ویژه در حجم ثابت است. دسته دوم معادلات مربوط به مدل سازی اغتشاش جریان است. در این مطالعه از مدل تک-معادله‌ای ال‌ای‌اس (Large eddy simulation) که یک مدل لزجت گردابه می‌باشد استفاده شده است. در این مدل معادله انتقال برای انرژی جنبشی زیرشبکه به صورت رابطه (۵) بیان می‌گردد.

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = -\tau_{ij}\tilde{S}_{ij} - C_e \rho \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\Delta} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu_{SGS} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

در معادله فوق، τ_{ij} و $\tilde{S}_{ij}$ به ترتیب تنسور تنش زیرشبکه و تنسور نرخ کرنش می‌باشند. این کمیت‌ها به ترتیب مطابق روابط (۶) و (۷) تعریف می‌شوند.



شکل (۱) شماتیک هندسه و پروپهای فشار

جدول (۱) پارامترهای ابعادی در پیکربندی شکل ۱

پارامتر	L	H	W	D	D1	D2
مقدار (متر)	۸/۵	۰/۶	۰/۶	۱/۲	۱/۷	۱/۸

جدول (۲) مختصات فضایی ماده منفجره و حسگرهای فشار

پارامتر	G1	G2	G3	G4	G5	منفجره
مختصات x (متر)	۲/۹	۴/۷	۷/۷	۷/۷	۷/۷	صفر
مختصات y (متر)	۰/۳	۰/۳	۰/۹	۰/۳	۰/۳	صفر
مختصات z (متر)	صفر	صفر	صفر	صفر	-۲/۱۲۵	صفر

۳- الگوریتم حل عددی

۳-۱- حل مسئله با استفاده از حلگر توسعه یافته سونیک فوم

حلگر فشارپایه سونیک فوم از محدود حلگرهای نرم افزار متن باز این فوم است که قابلیت شبیه سازی پدیده های مربوط به جریان-های تراکم پذیر با اعداد ماخ بالا را داراست. این حلگر قادر است مسائل ترانسونیک (Transonic) و سوپرسونیک (Supersonic) را با بهره مندی از معادلات مربوط به مدل های اغتشاشی به صورت عددی شبیه سازی و حل نماید. در این مطالعه از حلگر توسعه یافته نویسندگان در مرجع [11] استفاده شده است. در این حلگر S جمله چشمه ای است که برای احتساب انرژی انفجار در نظر گرفته می شود و توسط رابطه (۱۳) محاسبه می شود.

$$S = \frac{Q_{DET} dV}{Vol dt} \quad (13)$$

در رابطه فوق Vol حجم ماده منفجره است که معادل $\frac{4}{3}\pi r_{DET}^3$ می باشد. Q_{DET} نیروی انفجار است و $\frac{dV}{dt}$ توسط رابطه (۱۴) تعریف می شود. فرض می شود انرژی انفجار در زمان t_{DET} با نرخ ثابت سوزش V_{G1} شروع به آزاد شدن می نماید.

$$\frac{dV}{dt} = \begin{cases} 4\pi v_{G1}^3 t^2 & t < t_{DET} \text{ and } r < r_{DET} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

برای محاسبه تغییرات چگالی جریان نیز، معادله حالت بی-کا-دبلیو به کتابخانه معادلات حالت حلگر سونیک فوم اضافه شده است. همان طور که در معادله (۱۰) دیده می شود، یک رابطه ضمنی نسبت به متغیر X وجود دارد و مقدار چگالی نمی تواند به صورت مستقیم محاسبه گردد. بنابراین، یک روش تکراری با الگوریتم شناخته شده نیوتن-رافسون به کار گرفته شد تا مقدار چگالی محاسبه شود. روند مراحل حل عددی پژوهش حاضر با

که در هنگام ورود جریان به دامنه مقدار کمیت را به شکل صریح اعمال می نماید. برای کمیت فشار، مقدار اولیه یک بار در کل دامنه محاسباتی اعمال شده است. دما نیز معادل ۳۰۰ کلوین و سرعت اولیه نیز در کل دامنه معادل صفر در نظر گرفته شده است.

۳-۲- طرح های گسسته سازی

گسسته سازی معادلات حاکم، به شکل گیری دستگاه معادلات خطی منتج می شود که با استفاده از الگوریتم های عددی حل می گردد. در این مطالعه، ادغام دو الگوریتم کوپلینگ فشار-سرعت، پیژو و سیمپل به کار گرفته شده است. دو تکرار برای پیش بینی مومنتوم و دو تکرار برای تصحیح فشار لحاظ شده تا هم دقت و هم پایداری در حل جریان سرعت بالا تضمین گردد. برای همگرایی اولین مرحله از تصحیح فشار، انحراف نسبی معادل $1e^{-2}$ در نظر گرفته شده، در حالی که برای مرحله دوم از تصحیح فشار، انحراف سخت گیرانه $1e^{-10}$ اعمال گردیده است. برای سرعت و انرژی در مرحله اول پیش بینی، انحراف نسبی $1e^{-2}$ لحاظ شده و برای مرحله دوم نیز مقدار $1e^{-7}$ اعمال شده است. برای کمیت های آشفتگی نیز انحراف همگرایی مشابه سرعت بوده است. در مطالعات عددی پدیده انفجار، به علت ایجاد گرادیان های شدید متغیرهای میدان جریان، همگرایی حل عددی می تواند با چالش هایی روبرو شود. لذا انتخاب صحیح تنظیمات مربوط به حل، تأثیر به سزایی در حصول همگرایی آن دارد. شبیه سازی ها بر روی یک کلاستر محلی با قابلیت پردازش موازی با تعداد ۸ هسته ۳/۴ گیگاهرتزی انجام شده است. روش اولر مرتبه دو برای زمان و طرح مرتبه دو تی وی دی (Total variation diminishing) برای گسسته سازی مکانی جمله جابجایی اعمال شده است. برای گسسته سازی مکانی جمله گرادیان نیز از طرح مرتبه دو مرکزی استفاده شده است. به منظور فراهم آوردن دقت زمانی بالا در شبیه سازی ها، حلگر با عدد کورانت ماکزیم ثابت معادل ۰/۱ تنظیم شده است تا گام زمانی با توجه به آن محاسبه و اعمال گردد.

۴-۲- پیکربندی مسئله و تولید شبکه

در این مطالعه، دامنه محاسباتی از ۴۰-متر تا ۴۰-متر در راستای x و از ۲۴-متر تا ۲۴-متر در راستای z امتداد یافته است. ارتفاع دامنه نیز معادل ۸ متر در راستای y در نظر گرفته شده است. نمای ایزومتریک دامنه محاسباتی در شکل ۱ نمایش داده شده است. پارامترهای ابعادی در پیکربندی شکل ۱، به همراه مختصات فضایی حسگرهای فشار به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، از ابزار اسنپی هگزمش (SnappyHexMesh) برای تولید سلول های شش وجهی با کیفیت بالا استفاده شده است.

LES در حلگر توسعه یافته سونیک فوم در نظر گرفته شده است، چرا که نتایج حلگر بلست فوم دارای الگویی مشابه بوده است. سیگنال‌های زمانی فشار که در حسگر G1 گزارش گرفته شده‌اند برای سه شبکه مذکور در شکل ۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که شبکه متوسط (یک میلیون و ۲۰۰ هزار سلول) و شبکه ریز (سه میلیون سلول) نتایج بسیار مشابهی دارند. همچنین، آشکار است که شبکه درشت (۶۰۰ هزار سلول) منجر به نوسان سیگنال نزدیک انتهای آن شده است. بر همین مبنا، شبکه متوسط برای شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر انتخاب شده است. تعداد سلول‌ها برای شبکه منتخب در راستای x ، y و z به ترتیب معادل ۲۰۰، ۳۰ و ۱۲۰ می‌باشد. این سلول‌ها در مرحله اول به طور یکنواخت توزیع شده‌اند. سپس اسنپی‌هگزش به کار گرفته شد تا مش را به سمت بلوک‌ها و ناحیه انفجار فشرده کند. تعداد نهایی سلول‌ها در عرض یک بلوک (راستای x)، طول بلوک (راستای z) و ارتفاع بلوک (راستای y) به ترتیب برابر ۲۴، ۳۴۰ و ۳۶ می‌باشند و ناحیه انفجار توسط 20×20 سلول روی زمین پوشش داده شده است.

۲-۴- اعتبار سنجی

در این پژوهش برای صحت سنجی نتایج عددی، نتایج یک مطالعه تجربی که توسط شورای اجرایی سلامت و ایمنی در کشور انگلیس انجام شده و در آن پارامترهای مؤثر بر امواج فشاری بلست با سناریوهای متفاوت در مقیاس میدانی بررسی شده، به عنوان مبنا مورد استفاده قرار گرفته است [23]. مطابق این مرجع،

حلگر فشارپایه توسعه یافته در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳-۲- حل مسئله با استفاده از حلگر بلست فوم

تاکنون چهار نسخه از حلگر بلست فوم توسعه داده شده و در نسخه اخیر علاوه بر برطرف کردن نقایص مربوط به همگرایی و اعمال پارامترهای فیزیکی، تعدادی معادله حالت گاز حقیقی نیز به کد حلگر اضافه شده است [14].

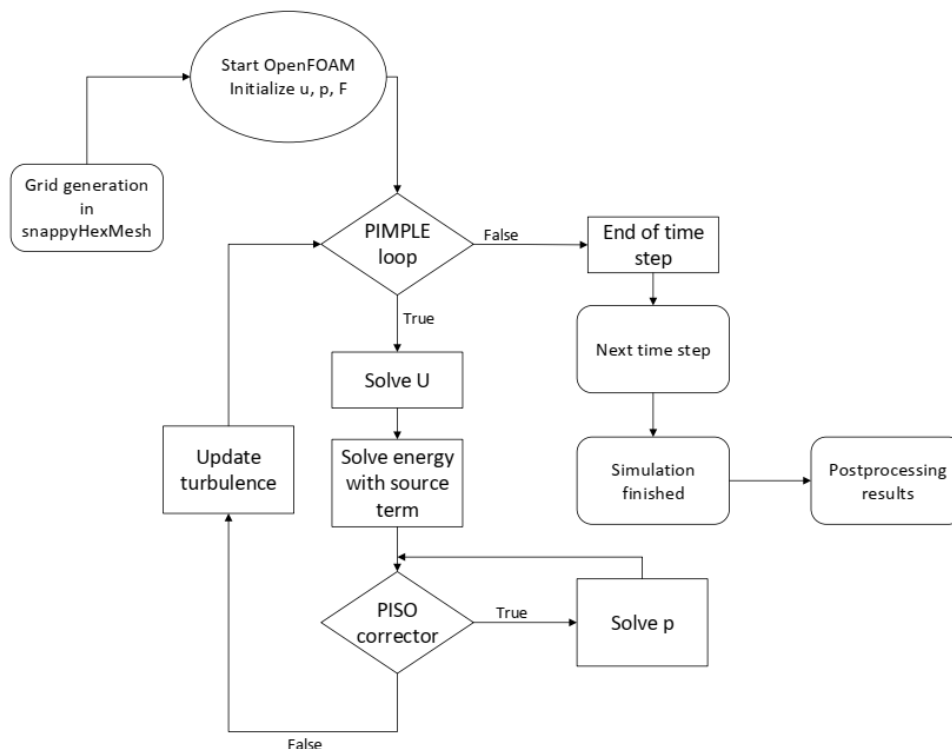
از جمله قابلیت‌های مهم حلگر بلست فوم بهبود کیفیت و اندازه شبکه در حین اعمال انرژی انفجار با استفاده از ابزار ست ریفایند فیلدز (SetRefinedFields) است که توسعه داده شده ابزار ست-فیلدز (SetFields) می‌باشد. بدین صورت که در لحظات ابتدایی آزادسازی انرژی که سرعت حرکت موج بسیار بالا است و جبهه موج در نقاط نزدیک مرکز انفجار است، تنها در نقاط اطراف مرکز انفجار شبکه اصلاح می‌شود.

با گذشت زمان و پیشرفت موج انفجار، نقاطی که در آن‌ها شبکه ریزتر شده افزایش می‌یابد. این قابلیت موجب کاهش زمان حل و هزینه‌های محاسباتی می‌گردد. الگوریتم شبیه‌سازی و حل عددی مسئله حاضر با حلگر دانسیته پایه بلست فوم در شکل ۳ ارائه شده است.

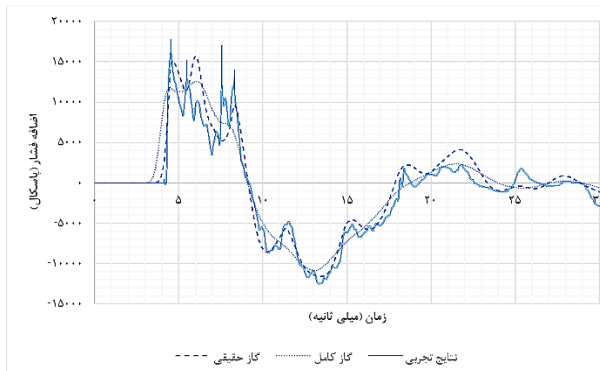
۴- نتایج و بحث

۴-۱- حساسیت به اندازه شبکه

در این بخش، نتایج مربوط به سه شبکه محاسباتی با تعداد ۶۰۰ هزار، یک میلیون و ۲۰۰ هزار و سه میلیون سلول با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این مقایسه‌ها، تنها نتایج مربوط به روش



شکل ۲) تولید شبکه و الگوریتم حل عددی مطالعه حاضر با حلگر سونیک فوم توسعه یافته

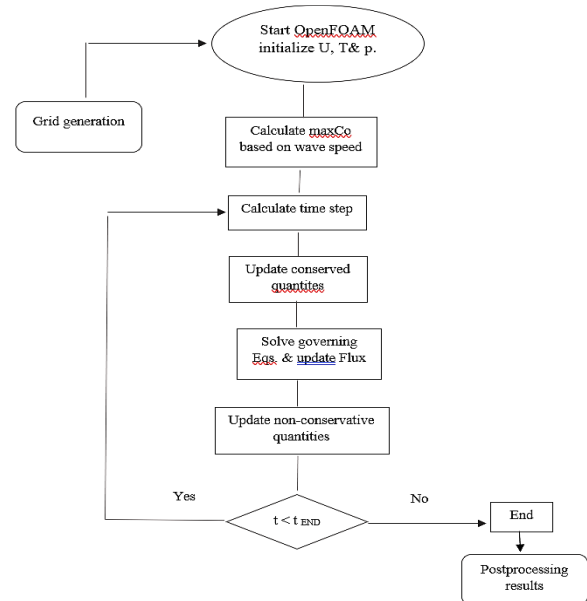


شکل ۵) مقایسه داده‌های تجربی و نتایج فشار-زمان حل عددی با معادله حالت گاز کامل و گاز حقیقی؛ حسگر G1؛ حلگر سونیک فوم توسعه یافته

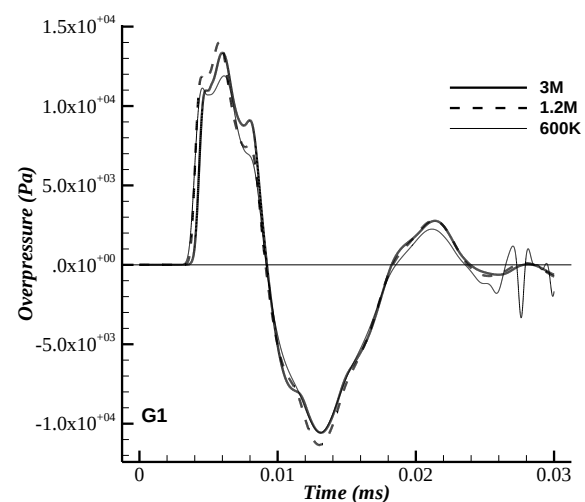
شده است با همتای آزمایشگاهی کاملاً مطابقت دارد، هرچند مقدار آن کمتر بدست آمده است. بخشی از دلیل آن می‌تواند به عدم قطعیت در نتایج آزمایشگاهی نسبت داده شود. حل عددی با معادله حالت گاز کامل دو قله اول حل تجربی در فاز مثبت را بیشتر شبیه یک برجستگی (یعنی با مقدار عددی کمتر و کاهش و افزایش غیر محسوس) پیش‌بینی کرده است. قله سوم نیز در این حل نسبت به آخرین قله در نتایج تجربی به لحاظ زمانی زودتر و به طور آشکار با مقدار عددی کمتر پیش‌بینی شده است. سیگنال فشار در بی-کا-دبلیو در تمام فاز منفی با دقت بسیار بالایی با نتایج تجربی منطبق شده است در حالی که این تطابق برای حل عددی با گاز کامل مشاهده نمی‌شود. بعد از اتمام فاز منفی، نتایج بی-کا-دبلیو همچنان پیش‌بینی نزدیک‌تری به داده‌های آزمایشگاهی ارائه کرده‌اند.

با مقایسه پروفیل حاصل از داده‌های حل عددی، می‌توان گفت حل عددی با گاز کامل به نموداری منتج شده که به نوعی حالت "یکنواخت شده" نمودار حاصل از معادله حالت حقیقی می‌باشد. با توجه به مقایسه‌هایی که در شکل ۵ صورت پذیرفت، به طور کلی می‌توان گفت که نتایج حاصل از رهیافت بی-کا-دبلیو در مطالعه حاضر نسبت به نتایج عددی گاز کامل تطابق بیشتری با داده‌های تجربی دارد. به منظور راستی‌آزمایی این ادعا، خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی برای نمودارهای فشار زمان ارائه شده در شکل ۵، بصورت کمی در جدول ۳ نمایش داده شده و همچنین در بخش بعدی خطای دینامیکی و انحراف از استاندارد حل‌های عددی ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ می‌توان بیان نمود حل عددی با معادله حالت واقعی مشخصه‌های مهم موج بلست مانند ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت، زمان رسیدن موج، زمان رسیدن به ماکزیمم، ماندگاری موج در فاز مثبت، ایمپالس فاز مثبت و همچنین ماکزیمم اضافه فشار فاز منفی را با خطای به مراتب کمتری نسبت به حل عددی با معادله حالت گاز ایده‌آل پیش‌بینی کرده است.

شکل ۶ فراوانی داده‌های حل عددی برای رخداد خطا و میزان



شکل ۳) تولید شبکه و الگوریتم حل عددی مطالعه حاضر با حلگر بلست-فوم

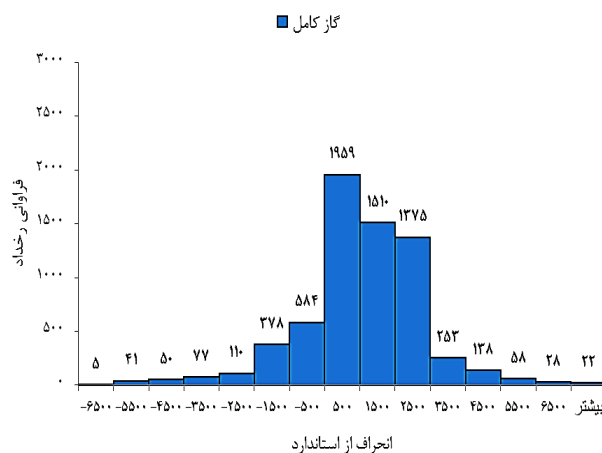
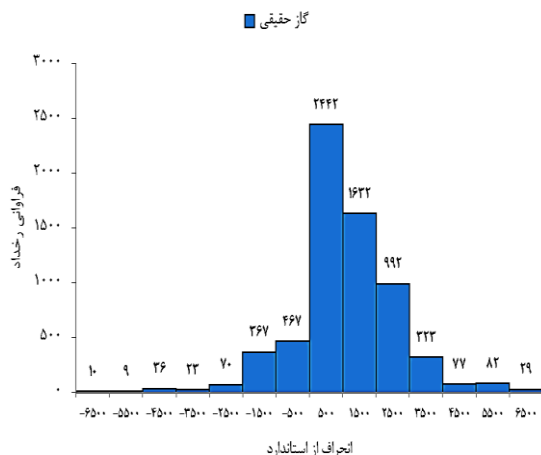


شکل ۴) مطالعه حساسیت نتایج به شبکه محاسباتی

مقدار ۳۲۰ گرم از ماده منفجره پی-ای-فور (PE4) بصورت نیم‌کره از طریق یک چاشنی که بر روی ماده منفجره قرار داده شده فعال می‌شود و تاریخچه زمانی فشار بعد از انفجار، توسط حسگرهای فشار ثبت می‌شود.

۴-۲-۱- نتایج حل مسئله با حلگر توسعه یافته سونیک فوم

شکل ۵ مقایسه داده‌های تجربی و نتایج حل عددی را برای تغییرات فشار محلی بر حسب زمان با معادله حالت گاز کامل و گاز حقیقی با حلگر توسعه‌یافته سونیک فوم را نشان می‌دهد. حل عددی با معادله حالت بی-کا-دبلیو به خوبی قله اول در فاز مثبت را پیش‌بینی کرده و قله دوم نیز به لحاظ کمی با حل تجربی تطابق دارد اما به لحاظ زمانی با کمی تأخیر همراه است. مکان قله سوم در فاز مثبت که توسط بی-کا-دبلیو پیش‌بینی



شکل ۶) انحراف از استاندارد نتایج حل عددی؛ حلگر سونیک فوم توسعه یافته؛ استاندارد: داده‌های تجربی

که حجم مولکول‌ها (b)، قسمت قابل ملاحظه‌ای از حجم کلی (v) را تشکیل می‌دهند، فشار تقریباً با نسبت حجم آزاد (v-b) بالا می‌رود و علت اصلی انحراف از معادله حالت گاز ایده‌آل همین مطلب می‌باشد [24, 25].

در مورد مواد منفجره جامد یا مایع به علت چگالی اولیه بالاتر مواد، سرعت پیشروی موج و فشار گازهای حاصل به مراتب بالاتر از مخلوط‌های گازی قابل اشتعال است لذا تحت چنین شرایطی فرض معادله حالت گاز ایده‌آل، فرض غیر منطقی است و بهتر است از معادلات حالت واقعی برای محصولات انفجار استفاده نمود. در میان معادلات پیشنهادی برای محصولات گازی انفجار، معادله حالت بی-کا-دبلیو بصورت گسترده در محاسبات هیدرودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا در برابر شوک تجربی هوگونیوت کالبره شده، یک معادله حالت کامل است و وابستگی صریح به دما دارد. معادله حالت بی-کا-دبلیو به دلیل پایه فیزیکی آن برای شبیه‌سازی محاسباتی انفجار بسیار مناسب است و منجر به نتایج با دقت بالا می‌شود [26, 27].

۴-۲-۲- نتایج حل مسئله با حلگر بلست فوم

شکل ۷ مقایسه داده‌های تجربی و نتایج فشار-زمان حل عددی با معادله حالت گاز حقیقی را با حلگر بلست فوم نشان می‌دهد. سیگنال بدست آمده از حل عددی، قله اول در فاز مثبت را با تأخیر زمانی و مقدار کمی آن را نیز بیش از مقدار تجربی پیش‌بینی کرده است که مشابه همین روند برای قله دوم نیز اتفاق افتاده است. مکان قله سوم در حل عددی با همتای آزمایشگاهی تطابق دارد اما مقدار عددی آن بسیار کمتر گزارش شده است. در فاز منفی، نتایج حل عددی تقریباً پیش‌بینی مناسبی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی دارند؛ پس از آن در فاز مثبت تا حدود ۲۴ میلی‌ثانیه تطابق قابل قبول مشاهده می‌شود اما پس از زمان مذکور تا پایان زمان شبیه‌سازی نتایج حل عددی و داده‌های تجربی از یکدیگر واگرا شده‌اند.

جدول ۳) محاسبه خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی برای کمیت‌های مختلف در حسگر G1؛ حلگر سونیک فوم توسعه یافته

قدر مطلق خطای داده‌های حل عددی نسبت به داده‌های تجربی (%)					
ماکزیمم	زمان	زمان	ماندگاری	ایمپالس	ماکزیمم
حالت	اضافه فشار	رسیدن به	رسیدن به	موج در فاز	اضافه فشار
فاز مثبت	فاز مثبت	ماکزیمم	مثبت	فاز منفی	فاز منفی
بی-کا-دبلیو	۱۳/۲۹	۶/۸۹	۲/۲۲	۲/۶۷	۸/۴۵
گاز کامل	۲۸/۹۹	۳۲/۱۲	۳۳/۱۱	۴/۴۸	۱۹/۸۵

انحراف از استاندارد را برای دو معادله حالت در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. در این تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به عنوان حالت استاندارد در نظر گرفته شده و هر یک از نقاط محور افقی از رابطه (۱۵) محاسبه شده است:

$$\text{Standard Deviation} = P_{\text{numerical}} - P_{\text{experimental}} \quad (15)$$

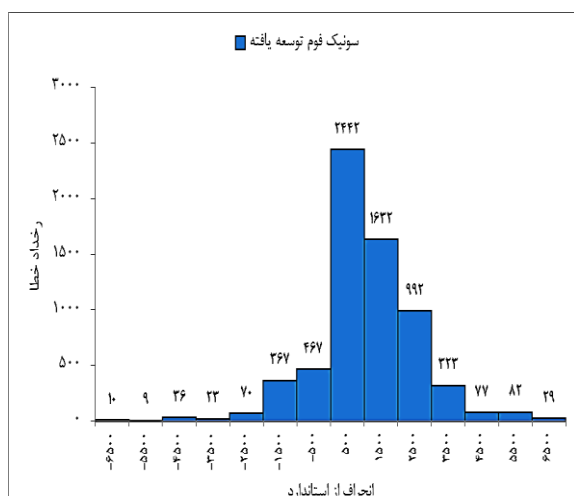
بنابراین در نقاطی که داده‌های مدل‌سازی عددی فشار با داده‌ی آزمایشگاهی همخوانی دارد میزان انحراف از استاندارد صفر بدست می‌آید و هرچه اختلاف مدل‌سازی بیشتر باشد میزان انحراف از استاندارد نیز بیشتر می‌شود. فاصله گرفتن از استاندارد (رخداد خطای صفر)، به معنی خطای بیشتر می‌باشد و بر طبق انتظار برای هر دو نمودار از تعداد نقاط با خطای بالا کاسته شده است اما کاهش تعداد نقاطی که خطای بالاتری را نشان می‌دهند در گاز بی-کا-دبلیو بیشتر بوده است یعنی اینکه نتایج مدل‌سازی عددی برای این گاز در اکثر نقاط با خطای کمتری نسبت به گاز ایده‌آل بوده است. به عنوان توضیح بیشتر میزان انحراف از استاندارد ۱۶۰۰-۲۴۰۰ پاسکال برای گاز بی-کا-دبلیو در ۸۹۲ نقطه رخ داده است در صورتی که این خطا در گاز ایده‌آل در ۱۲۶۲ نقطه ایجاد شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل‌سازی گاز بی-کا-دبلیو نسبت به گاز ایده‌آل از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار بوده است. بطور کلی با توجه به اینکه معادله حالت محصولات انفجار تابع پیچیده‌ای از فشار، درجه حرارت و جرم حجمی است؛ در دانسیته پایین، معادله حالت گاز ایده‌آل را می‌توان با تقریب خوبی بکار برد. اما در دانسیته‌های بالا

انفجار می‌باشند را با خطای کمتری نسبت به حلگر توسعه یافته سونیک‌فوم پیش‌بینی کرده است. از جمله دلایل این مشاهده، می‌توان به تفاوت در الگوریتم حل دو حلگر اشاره نمود. حلگر بلست‌فوم یک حلگر دانسیته‌پایه است که قاعده‌تاً برای شبیه‌سازی جریان‌های تراکم‌پذیر (با اعداد ماخ بالا) مناسب‌تر است. در حلگرهای دانسیته‌پایه از حل معادله پیوستگی توزیع چگالی بدست می‌آید، سپس معادلات مومنتوم و انرژی حل می‌گردد و در نهایت فشار به کمک معادله حالت بصورت تابعی از چگالی و دما محاسبه می‌شود. اما در حلگرهای فشارپایه (که برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر نوشته شده و بعدها الگوریتم حل آن‌ها برای جریان‌های تراکم‌پذیر بسط داده شده است)، چگالی از طریق معادله حالت بصورت تابعی از فشار و دما بروز می‌شود.

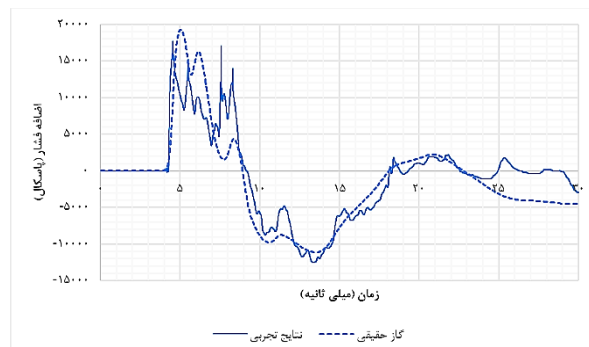
همین تفاوت در عملکرد و محاسبه چگالی بصورت یک متغیر اصلی (Primary) در حلگرهای دانسیته‌پایه، می‌تواند منجر به نتایج دقیق‌تری برای حل عددی جریان‌های تراکم‌پذیر بشود. در مجموع می‌توان گفت هر دو شبیه‌سازی، مشخصه‌های مهم موج انفجار را با خطای قابل قبول کمتر از ۱۳ درصد نسبت به داده‌های تجربی گزارش کرده و نتایج قابل اتکا ارائه نموده‌اند.

جدول ۴) محاسبه خطای حل عددی نسبت به داده‌های تجربی برای کمیت‌های مختلف در حسگر G1؛ معادله حالت بی-کا-دیلیو

خطای داده‌های حل عددی نسبت به داده‌های تجربی (%)					
حلگر	ماکزیمم اضافه فشار	زمان رسیدن به موج در فاز مثبت	ماندگاری موج در فاز مثبت	ایمپالس فاز مثبت	ماکزیمم اضافه فشار
	فاز مثبت	موج	ماکزیمم	مثبت	فاز منفی
سونیک‌فوم توسعه یافته	۱۲/۲۹	۶/۸۹	۲/۲۲	۲/۶۷	۸/۴۵
بلست‌فوم	۱۰/۶۱	۲/۳۸	۱۰/۹۳	۷/۰۸	۵/۷۸



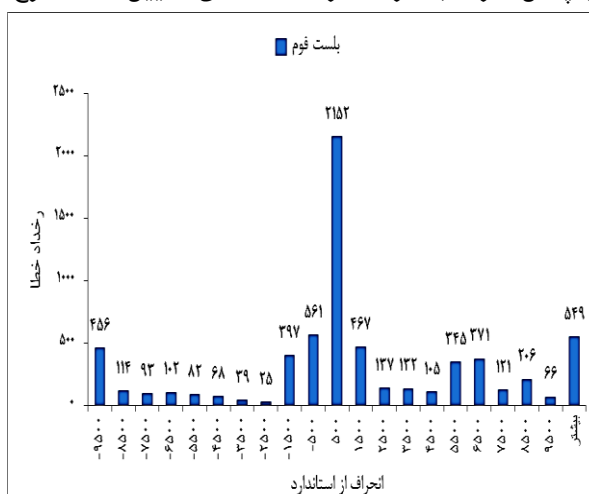
شکل ۸) انحراف از استاندارد داده‌های حل عددی با حلگر دانسیته پایه بلست‌فوم و حلگر توسعه یافته فشارپایه سونیک‌فوم؛ استاندارد: داده‌های تجربی



شکل ۷) مقایسه داده‌های تجربی و نتایج فشار-زمان حل عددی با معادله حالت گاز حقیقی؛ حسگر G1؛ حلگر بلست‌فوم

شکل ۸، میزان انحراف حل عددی از داده‌های آزمایشگاهی را برای نتایج حاصل از دو حلگر توسعه یافته سونیک‌فوم و بلست‌فوم نشان می‌دهد. در این تحلیل، داده‌های آزمایشگاهی به عنوان حالت استاندارد در نظر گرفته شده و هر یک از نقاط محور افقی از رابطه (۱۵) محاسبه شده‌اند. در شکل ۸ به وضوح مشاهده می‌شود رخداد خطا در بازه‌های مختلف برای حلگر توسعه داده شده سونیک‌فوم نسبت به حلگر بلست‌فوم کمتر بوده و این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج حاصل از حلگر فشارپایه نسبت به حلگر دانسیته پایه از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار بوده است. برای مقایسه دقیق‌تر عملکرد دو حلگر، درصد خطای مشخصه‌های مهم انفجاری از جمله بیشینه فشار فاز مثبت و منفی، زمان رسیدن موج، ایمپالس موج انفجار در فاز مثبت، زمان رسیدن به بیشینه فشار و ماندگاری موج در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج جدول ۴ که مربوط به کمیت‌های مختلف در حسگر G1 می‌باشد، این طور نشان می‌دهد که حلگر بلست‌فوم پارامترهای مهم ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت، زمان رسیدن موج و ایمپالس فاز مثبت را که از مشخصه‌های تعیین کننده موج



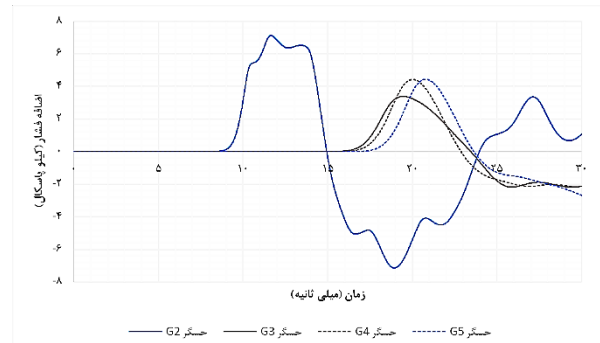
برای حسگر G2 نسبت به سایر حسگرها (G3-G5) اشاره نمود (جدول ۵). این مشاهده نیز اهمیت دو پارامتر موانع هندسی و موقعیت فضایی را نسبت به رفتار موج بلست نشان می‌دهد. در شکل ۱۰ صفحات همتراز فشار حول بلوک‌ها برای دو نقطه در زمان به تصویر کشیده شده است. صفحات همتراز مشاهده شده نمایانگر جبهه موج ضربه‌ای هستند که به سبب انفجار تولید می‌شود. رشد اندازه این صفحات که شبیه یک نیم‌کره هستند در طول زمان مشهود است. مشاهده می‌گردد که در اولین زمان در شکل ۱۰، جبهه موج از مانع اول عبور کرده است و در حال نزدیک شدن به مانع دوم می‌باشد. در زمان دوم، موج ضربه‌ای تقریباً موانع اول و دوم را کامل در بر گرفته، جبهه موج از سطوح جانبی مانع دوم عبور کرده و در حال نزدیک شدن به مانع سوم می‌باشد. در شکل ۱۱، تغییرات کانتور لحظه‌ای عدد ماخ بر روی صفحه قطع کننده موانع به تصویر کشیده شده است (نصف ارتفاع بلوک). حلقه سبز رنگ در زمان اول بیانگر این است که عدد ماخ در محل ماده منفجره پایین است. در زمان دوم، انفجار سبب تغییرات عدد ماخ در پشت بلوک اول شده است. این تغییرات در لحظه سوم به پشت بلوک دوم رسیده و در لحظه آخر می‌توان شاهد دو حلقه بود که در بین آنها ناحیه‌ای با عدد ماخ پایین‌تر تشکیل شده است. برای آگاهی از انرژی انفجار، کانتورهای دما در شکل ۱۲ ارائه شده است. می‌توان دید که بیشینه دما بین دو زمان ابتدایی به شدت افزایش یافته است و به طور کلی ناحیه‌ای که دما در آن بالاست به اطراف ماده منفجره محدود شده است. در زمان نهایی مشاهده می‌شود که بیشینه دما نسبت به زمان اولیه کاهش بسیار زیادی نداشته و به طور کلی در محیط یک توازن دمایی مشاهده می‌شود.

جدول ۵) مشخصه‌یابی نمودارهای فشار-زمان ارائه شده در شکل ۹

حسگر	ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت (کیلوپاسکال)	زمان رسیدن به ماکزیمم (میلی‌ثانیه)	ایمپالس فاز مثبت (پاسکال. ثانیه)	زمان رسیدن موج (میلی‌ثانیه)
G2	۷/۱۳	۱۱/۶۴	۳۸/۶۳	۸/۳۸
G3	۳/۳۹	۱۹/۴۶	۱۳/۳۴	۱۵/۲۹
G4	۴/۴۳	۲۰/۰۲	۱۴/۱۵	۱۵/۹۴
G5	۴/۴۶	۲۰/۷۹	۱۳/۹۱	۱۷/۱۰

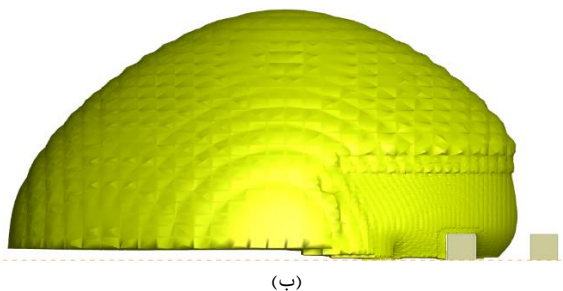
۳-۴- نتایج کمی و کیفی

شکل ۹ سیگنال‌های فشار-زمان حل عددی با حلگر بلست‌فوم را برای چهار حسگر که در پایین دست نقطه انفجار قرار داده شده‌اند، ارائه کرده و مشخصه‌یابی کمی برای امواج بلست ارائه شده در این شکل نیز، در جدول ۵ انجام شده است.

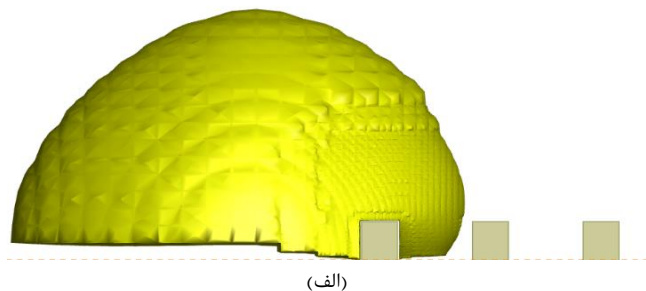


شکل ۹) نمودار فشار-زمان حل عددی با معادله حالت گاز حقیقی؛ حسگرهای G2 تا G5؛ حلگر بلست‌فوم

با توجه به نتایج شکل ۹ و مقادیر کمی گزارش شده در جدول ۵ می‌توان بیان نمود ماکزیمم اضافه فشار و ایمپالس فاز مثبت در حسگر G2 که به ترتیب معادل ۷/۱۳ کیلوپاسکال و ۳۸/۶۳ پاسکال.ثانیه می‌باشد نسبت به حسگر G1 که به ترتیب معادل ۱۶/۲۹ کیلو پاسکال و ۵۶/۹۵ پاسکال.ثانیه بوده، کاهش محسوسی داشته است. این مشاهده ناشی از حضور موانع هندسی برای به دام انداختن امواج فشاری می‌باشد. در حسگر G3 نیز سطح فشار نسبت به حسگر G2 کاهش یافته و یک تغییر سریع در سیگنال فشار (مینی بر رسیدن شوک) را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان گفت موانع هندسی سرعت انتشار امواج را نیز تحت تاثیر قرار داده است زیرا زمان رسیدن موج در حسگر G3 (۱۵/۲۹ میلی‌ثانیه) کوچک‌تر از حسگر G4 (۱۵/۹۴ میلی‌ثانیه) می‌باشد. در حسگر G4 مقدار بیشینه فشار (۴/۴۳ کیلوپاسکال) اندکی بزرگ‌تر از G3 (۳/۳۹ کیلوپاسکال) است، زیرا این حسگر در ارتفاع پایین‌تری نسبت به G3 قرار دارد. برای حسگر G5 که دور از خط مرکزی می‌باشد، نتایج مشابه حسگر G4 بوده با این تفاوت که زمان رسیدن موج برای حسگر G4 به دلیل قرار گرفتن در خط مرکزی انفجار، کوچک‌تر می‌باشد. همچنین از دیگر نتایج می‌توان به تفاوت محسوس در مقدار کمی پارامتر ایمپالس در فاز مثبت

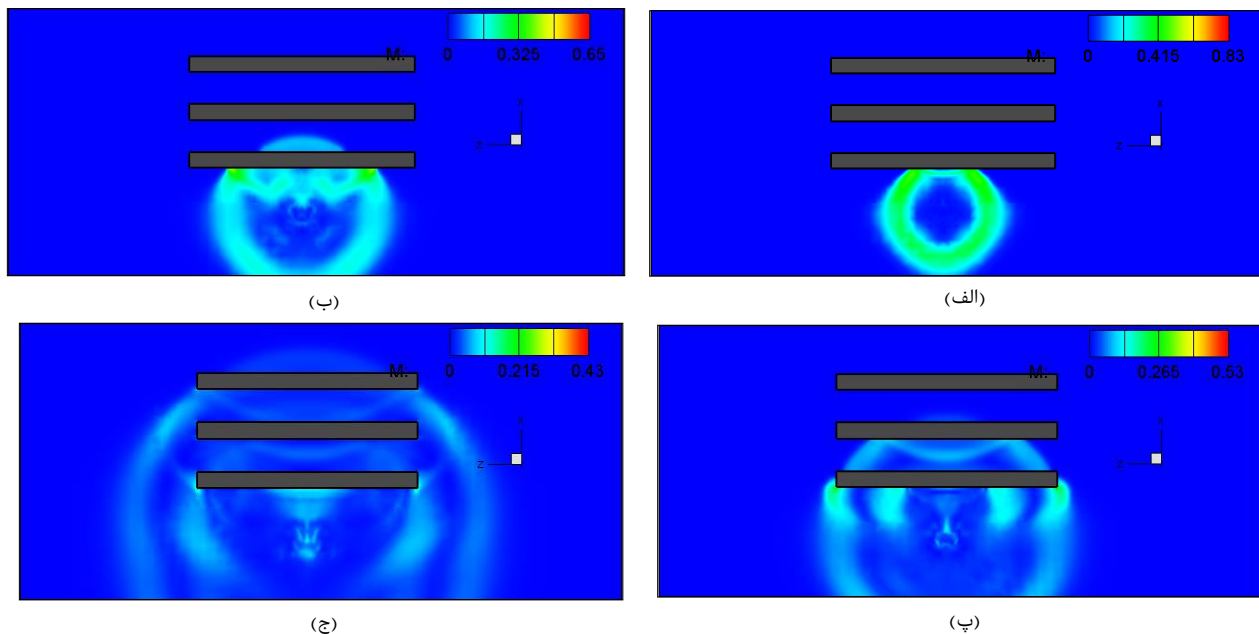


(ب)

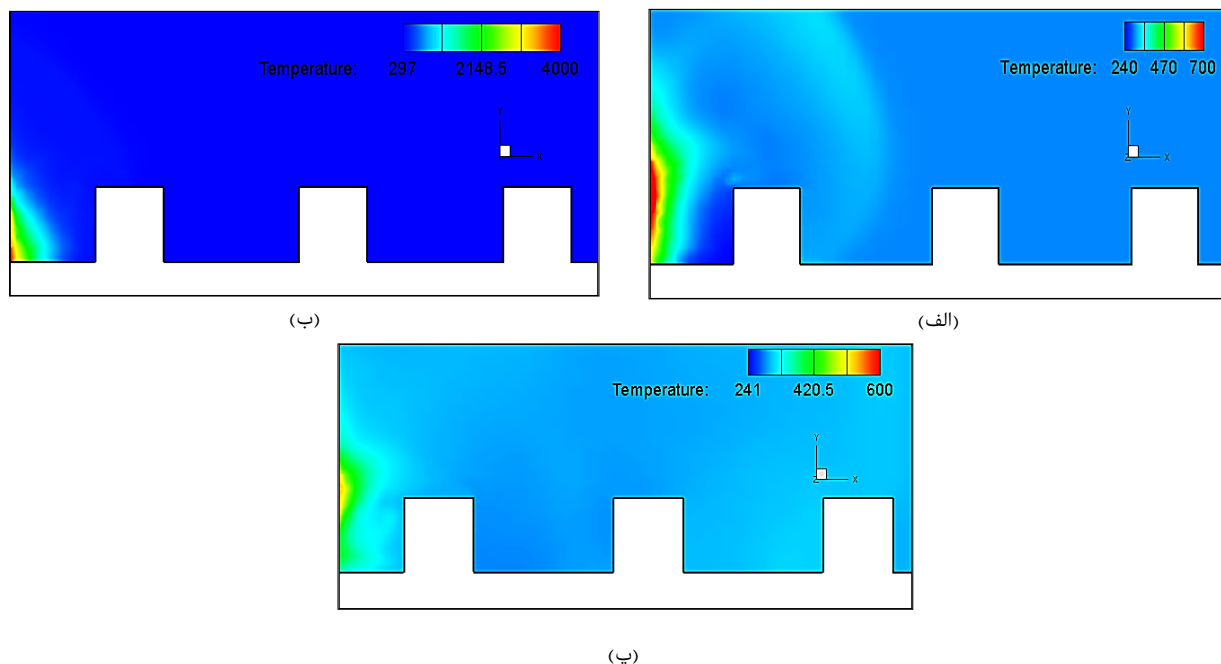


(الف)

شکل ۱۰) صفحات همتراز فشار برای دو زمان مختلف؛ (الف): ۵ میلی‌ثانیه، (ب): ۱۱ میلی‌ثانیه



شکل ۱۱) کانتورهای لحظه‌ای عدد ماخ؛ (الف): ۲ میلی‌ثانیه، (ب): ۵ میلی‌ثانیه، (پ): ۹ میلی‌ثانیه، (ج): ۱۵ میلی‌ثانیه



شکل ۱۲) کانتورهای لحظه‌ای دما (کلوین)؛ (الف): ۲ میلی‌ثانیه، (ب): ۵ میلی‌ثانیه، (پ): ۱۵ میلی‌ثانیه

۵- نتیجه‌گیری

قابلیت پیش‌بینی پیامدهای انفجار از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتری از اهمیت بالایی برخوردار است. در مطالعه حاضر رفتار جریان موج انفجار در فضای باز و در حضور موانع هندسی به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم بررسی شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده اثر نوع حلگر و نوع معادله حالت مورد استفاده بر دقت نتایج بررسی شده است. بخشی از نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

معادله حالت حقیقی بی-کا-دبلیو که در برابر شوک تجربی هوگونیوت کالیبره شده، نتایج دقیق‌تری در مورد مشخصه‌های

مهم موج انفجار نسبت به داده‌های تجربی در مقابل معادله حالت گاز کامل ارائه کرده است.

خطای دینامیک و انحراف از استاندارد (استاندارد: داده‌های تجربی) برای حل‌های عددی با معادلات حالت مختلف محاسبه گردید؛ مدل‌سازی گاز حقیقی نسبت به گاز ایده‌آل از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار بوده است.

حلگر دانسیته پایه بلست‌فوم پارامترهای مهم ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت، زمان رسیدن موج و ایمپالس فاز مثبت را که از مشخصه‌های تعیین‌کننده موج انفجار می‌باشند را با خطای کمتری نسبت به حلگر فشار پایه توسعه یافته سونیک‌فوم

- 12- S. Kuang, Z. Li, A. Yu, Review on modeling and simulation of blast furnace. *Steel research international*, Vol, 89, No. 1, p.1700071, 2018.
- 13- Sugiyama Y, Homae T, Wakabayashi K, Matsumura T, Nakayama Y. Numerical simulations on the attenuation effect of a barrier material on a blast wave. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014; 32:135-43.
- 14- J. Heylmon, P. Vonk, T. Brewer, blastFoam 6.0 User Guide. *Synthetic Applied Technologies, LLC*, 2022.
- 15- T. Brewer, J. Heylmon, P. Vonk, Employment of the Open-source Airblast Solver blastFoam to Support the Super Heavy Improvised Explosive Loading Demonstration (SHIELD) Test Program. *presented at the ISIEMS, USA*, 2019.
- 16- D. Stephens, P. Vonk, T. Brewer, Validation of Open-source Airblast Solver (blastFoam) in an Urban Environment. *presented at the MABS, Hague, Netherlands*, 2018.
- 17- P. Vonk, A New OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with Application to High-Explosive Detonation. *presented at the OpenFOAM Users Conference, Cologne, Germany*, 2016.
- 18- P. Vonk, T. Brewer, A New OpenFOAM Solver for Compressible Multi-Fluid Flow with Application to High-Explosive Detonation and Extended Validation, *presented at the OpenFOAM Users Conference, USA*, 2016.
- ۱۹- مینائیان، ع. توانگر روستا، س. نورپور، ز (۱۴۰۰). بررسی اثر استفاده از معادله حالت گاز حقیقی بر شبیه‌سازی انفجار و تنظیم تجربی معادله حالت. *نشریه مواد پیرانرژی*، شماره ۲، ص.ص. ۱-۱۰۴. ۹۳
- 20- W.W. Kim, S. Menon, A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations. *In 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, p. 356, 1995.
- 21- Kozyrev NV. Reparametrization of the BKW equation of state for CHNO explosives which release no condensed carbon upon detonation. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015;12(4).
- 22- C.L. Mader, Detonation properties of condensed explosives computed using the Becker-Kistiakowsky-Wilson equation of state. *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*, 1963.
- 23- C. Catlin, M. Ivings, M.S. Myatt, D. Ingram, D. Causon, L. Qian, Explosion Hazard Assessment: A Study of the Feasibility and Benefits of Extending Current HSE Methodology to take Account of Blast Sheltering HSL/2001/04. *Health and safety laboratory*, 2001.
- 24- Tham CY. Numerical simulation on the interaction of blast waves with a series of aluminum cylinders at near-field. *International Journal of Impact Engineering*. 2009; 36(1):122-31.
- 25- Remennikov AM, Rose TA. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers & Structures*. 2005; 83(27):2197-205.
- 26- Suceca M, Ang HG, Serene Chan HY. Study of the effect of covolumes in BKW equation of state on detonation properties of CHNO explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 2013; 38(1):103-12.
- 27- Cengiz F, Ulas A. Numerical prediction of steady-state detonation properties of condensed-phase explosives. *Journal of hazardous materials*. 2009; 172(2-3):1646-51.

پیش‌بینی کرده است.

حلگر بلست‌فوم زمان رسیدن به ماکزیمم اضافه فشار فاز مثبت، ماندگاری موج و ماکزیمم اضافه فشار فاز منفی را به ترتیب با خطای ۸/۷۱٪، ۴/۴۱٪ و ۷/۱۲٪ بیشتر، نسبت به حلگر فشار پایه پیش‌بینی کرده است.

رفتار جریان موج انفجار در حضور موانع با صفحات همتراز فشار، کانتور لحظه‌ای عدد ماخ و کانتورهای دما بررسی گردید. نتایج کیفی بیانگر اثر قابل ملاحظه موانع بر پارامترهای مختلف فشار، انرژی و سرعت جریان می‌باشد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده اول، استفاده شده است.

منابع

- 1- Puttock JS, Yardley MR, Cresswell TM. Prediction of vapour cloud explosions using the SCOPE model. *Journal of Loss prevention in the Process Industries*. 2000;13(3-5):419-31.
- 2- Cant RS, Dawes WN, Savill AM. Advanced CFD and modeling of accidental explosions. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004;36:97.
- 3- O Mahian O, Kolsi L, Amani M, Estellé P, Ahmadi G, Kleinstreuer C, Marshall JS, Siavashi M, Taylor RA, Niazmand H, Wongwises S. Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows-Part I: Fundamentals and theory. *Physics reports*. 2019;790:1-48.
- 4- Kleinschmit NN. A shock tube technique for blast wave simulation and studies of flow structure interactions in shock tube blast experiments. *Engineering Mechanics Dissertations & Theses*. 2011.
- 5- Sklavounos S, Rigas F. Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles. *Journal of hazardous materials*. 2004;108(1-2):9-20.
- 6- Rigas F, Sklavounos S. Experimentally validated 3-D simulation of shock waves generated by dense explosives in confined complex geometries. *Journal of hazardous materials*. 2005; 121(1-3):23-30.
- 7- Sklavounos S, Rigas F. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004; 17(6):407-17.
- 8- Cullis IG, Nikiforakis N, Frankl P, Blakely P, Bennett P, Greenwood P. Simulating geometrically complex blast scenarios. *Defence technology*. 2016; 12(2):134-46.
- 9- Karimi TH, Nikkhah M. Numerical Modeling of Damage Caused by Internal Explosion on the Tunnel Concrete Lining. *Journal of energetic materials*, Vol, 15, No. 45, pp. 39-45, 2020.
- 10- Zhang X, Ding Y, Shi Y. Numerical simulation of far-field blast loads arising from large TNT equivalent explosives. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 70:104432.
- 11- Noorpoor Z, Tavangar S, Soury H, Hosseini SG. A Computational Fluid Dynamics approach for air blast propagation using OpenFOAM and Becker-Kistiakowsky-Wilson equation of state. *Heliyon*. 2020; 6(12):e05852.