Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(3) (2022) 103-106
DOI: 10.22060/mej.2021.19947.7145

Numerical Simulation of Compartment Fire with Flamelet Generated Manifold and Comparison with Other Combustion Models

M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this paper, the large eddy simulation was used and the one-equation method was adopted as the sub-grid method. In addition, the simulations are performed in three-dimensional, unsteady, and single-phase case and the Froude number is considered 0.000255. To investigate the effect of the combustion model, the combustion model of flamelet generated manifold is used in the simulation of fire in the room and the results of this combustion model are compared with infinite fast chemistry models and eddy dissipation models. Comparing the results, it can be seen that in the fire scenario in the room with a heat release rate of 62.9 kW, the mean temperature in the flame is approximately 1500 Kelvin. Also, the results of the eddy dissipation combustion model and infinite fast chemistry predict the temperature results better than the flamelet generated manifold combustion model; but, all three combustion models are close to experimental results with a relative error of less than 10%, in predicting the velocity. Due to the low computational cost of the flamelet generated manifold model and the ability to use detailed kinetics in this combustion model, as well as its acceptable accuracy, it is appropriate to use this model in the compartment fire simulation.

Review History:

Received: Apr. 26, 2021
Revised: Jul. 08, 2021
Accepted: Oct. 09, 2021
Available Online: Oct. 16, 2021

Keywords:

Compartment fire
Large eddy simulation
Combustion model
Flamelet generated manifold

1- Introduction

The compartment fire scenario is a significant part of common fires. In this scenario, the closed space causes changing the pattern of a flame formation relative to the pool fire, which in some cases even causes the flame to be extinguished [1]. If the compartment fire is connected to the open air through a duct or door, hot gases are released and fresh air enters the room, which can cause the flame to deflect. Depending on the outlet duct area, the fire is to be extinguished or reach a steady state [2].

In the first numerical research, basic combustion models such as volumetric heat source were used, which no combustion reactions are seen and no reactive species can be obtained in this combustion model. Gradually, combustion models such as the Eddy Dissipation Model (EDM), Eddy Dissipation Concept (EDC), and Infinite Fast Chemistry (IFC) were also used in numerical simulation of fire, (of course, these combustion models are still widely used). The weaknesses of these combustion models are the inability to model flame extinction, the inability to model all species involved in combustion, and the response to one or two-step kinetics.

Due to the weaknesses of these combustion models, in more recent research, the use of flamelet combustion models has been suggested [3]. The Flamelet Generated Manifold (FGM) combustion model is one of the flamelet models that, have positive points such as low computational time, the ability to use complete kinetics, and additionally the flame extinction.

In limited studies of fire numerical simulation, the combustion model of FGM has been used. Safarzadeh et al. [4] investigated the effect of radiation application on this combustion model using discrete ordinate radiation model and it was observed that the flame temperature decreases in the room due to the reduction of available oxygen and as a result, the use of radiation does not have a significant effect on the results. Safarzadeh et al. [5] used the FGM and modeled the different toxic species produced in fires. In this study, it was observed that the results of carbon monoxide species have a relative error of less than 15%, with the experimental results.

According to the review of studies, it can be seen that the combustion model has a significant role in fire simulation. In addition, the researcher has tried to model accurate details of the combustion and species by low computational time. Therefore, in recent numerical studies, a tendency has been found towards flamelet combustion models. Among the flamelet models, the FGM combustion model with advantages such as fire extinguishing modeling, low computational time, and the possibility of using complete kinetics, can be considered as one of the most reliable combustion models

*Corresponding author's email: pasdar@modares.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

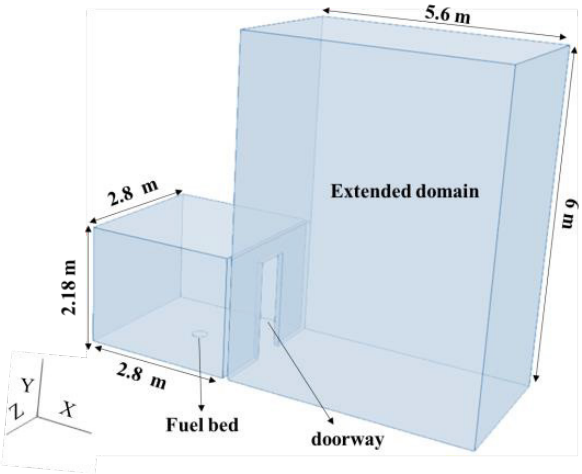


Fig. 1. Numerical geometry domain

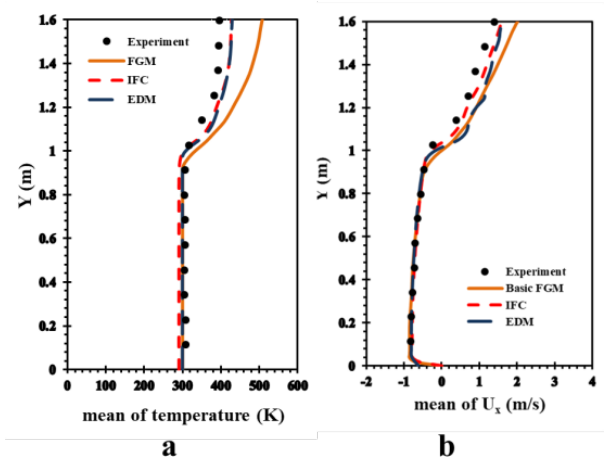


Fig. 2. a) Temperature and b) velocity at the doorway

in fire simulation. Examining the results of this model in different fire scenarios can show the efficiency of this combustion model more than before; therefore, the need to compare the results of different combustion models with the FGM model in the compartment fire scenario is one of the gaps in the previous studies.

In this study, the compartment fire is examined using the large eddy simulation method and the FGM combustion model, (which is a complete combustion model that predicts the exact details of fire hazardous species). The velocity and temperature fields of the FGM combustion model are compared with IFC and EDM combustion models.

2- Equations

Fire is a non-premixed flame which, equations related to reaction flow such as continuity, momentum, energy, mixture fraction, and turbulence equations can be filtered and used in simulation using the Favre filtering method [6]. For each of the combustion models, the related equations have been used, which can be referred to references [4, 6] for more information.

3- Numerical Method

Discretization methods for all terms of the equations of momentum, sub-grid kinetic energy, energy transfer, species, reaction progress variable, mixture fraction and its variance, the second-order approximation was used and for the time derivative expression in all equations, the Euler method was used [7]. Pimple was adopted as an algorithm for applying the dependence between velocity, pressure, temperature, and mixture fraction parameters and their variance [8].

Results and Discussion

In this section, the compartment fire scenario is selected according to Stekler's experimental results [9], and the results of the FGM combustion model are examined. For this purpose, first, the quality of the mesh is investigated with the LES_iq index and then the temperature and velocity results of the FGM are compared with other combustion models. According to the experimental geometry, the numerical geometric domain, which is shown in Fig. 1, was created.

The boundary condition of the walls was non-slip with adiabatic temperature. The inlet of the fuel bed was considered as the boundary condition of the velocity of 0.020 m/s with methane fuel (A heat release rate of 64 kW was used). Surrounding boundaries (extra space) were additionally assumed to be at ambient pressure (101 kPa).

In Fig. 2, the mean temperature and velocity results are seen versus the height at the doorway. The numerical results of three combustion models at the heights below the 1m are consistent with the experimental results; But at higher heights, where hot gases exit the room, the results of the EDM and IFC combustion models are much consistent than the FGM. In general, according to the results of the mean temperature in the doorway, it is observed that the results of the EDM and IFC are better than the FGM combustion models.

As can be seen, the numerical results of the velocity in the three combustion models are in good agreement with the experimental results; Although at higher altitudes there is some difference with the experimental results, however, in general, the mean velocity results are more accurate than the experimental results compared to the mean temperature results. So that at the height less than 0.1 m, the numerical results of the three combustion models, there is less than 2% relative error with the experimental results, and at a higher height, there is less than 10% relative error in the three combustion models.

4- Conclusions

In order to investigate the importance of the combustion model in compartment fire simulation, the FGM combustion model was used and the results were compared with IFC and EDM combustion models. The results of the IFC and EDM have a 10% lower relative error in predicting temperature results than the FGM combustion model. In addition, all

three combustion models had a relative error of less than 10% in predicting the velocity, inlet airflow to the room, and the height of the neutral line, which shows the appropriate accuracy of these combustion models.

References

[1] G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, S.C.P. Chueng, W.K. Kwok, On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Building and Environment, 38 (2003) 771-785.

[2] X. Chen, S. Lu, X. Wang, K.M. Liew, C. Li, J. Zhang, Pulsation Behavior of Pool Fires in a Confined Compartment with a Horizontal Opening, Fire Technology, 52 (2016) 515-531.

[3] S.C.P. Cheung, G.H. Yeoh, A.L.K. Cheung, R.K.K. Yuen, S.M. Lo, Flickering behavior of turbulent buoyant fires using large-eddy simulation, Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 52 (2007) 679-712.

[4] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Simulation of Pool and Compartment Fire Using Flamelet Generated Manifold With/Without Radiation Coupling, Arabian Journal for Science and Engineering, (2021) 1-10.

[5] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building, International Journal of Thermal Sciences, 159 106612.

[6] S.M.J. Razeghi, M. Safarzadeh, H. Pasdarshahri, Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(4) (2020).

[7] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Evaluation of LES sub-grid scale models and time discretization schemes for prediction of convection effect in a buoyant pool fire, Heat and Mass Transfer, (2020) 1-16.

[8] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Investigation of Compartment Fire under Maximum and Minimum of Natural Ventilation using FGM Combustion Model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2021) -.

[9] K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, STIN, 83 (1982) 19965.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Simulation of Compartment Fire with Flamelet Generated Manifold and Comparison with Other Combustion Models , Amirkabir J. Mech Eng., 54(3) (2022) 103-106.

DOI: 10.22060/mej.2021.19947.7145

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۳، سال ۱۴۰۱، صفحات ۴۹۳ تا ۵۰۸
DOI: 10.22060/mej.2021.19947.7145

شبیه‌سازی عددی آتش در اتاق با مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد و مقایسه با مدل‌های احتراقی دیگر

محمد صفرزاده، قاسم حیدری نژاد، هادی پاسدار شهری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

خلاصه: در این مقاله، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شد و روش تک-معادله‌ای به عنوان روش زیر شبکه اتخاذ گردید. همچنین شبیه‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی، غیر دائم و تک فاز انجام می‌شود و عدد فرود ۰/۰۰۰۲۵۵ در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور بررسی دقیق اثر مدل احتراقی، مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در شبیه‌سازی آتش در اتاق استفاده می‌شود و نتایج این مدل احتراقی با مدل‌های سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج مشاهده می‌شود که در سناریوی آتش در فضای اتاق با نرخ آزادسازی حرارت ۶۲/۹ کیلووات، دمای متوسط در شعله به‌طور تقریبی ۱۵۰۰ کلوین می‌شود. همچنین، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع بهتر از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد نتایج دما را پیش‌بینی کرده‌اند؛ اما در پیش‌بینی سرعت هر سه مدل احتراقی با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد، به نتایج تجربی نزدیک هستند. با توجه به هزینه‌ی محاسباتی پایین مدل تولید فلیملت منیفولد و توانایی استفاده از سینتیک کامل در این مدل احتراقی و همچنین دقت قابل قبول آن، استفاده از این مدل در شبیه‌سازی آتش در اتاق، مناسب است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:
آتش در ساختمان
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
مدل احتراقی
تولید فلیملت منیفولد

۱- مقدمه

سناریوی آتش در اتاق بخش قابل‌توجهی از آتش‌سوزی‌های رایج را تشکیل می‌دهد. در این سناریو، فضای بسته باعث می‌شود که الگوی تشکیل شعله‌ی آتش به نسبت حالت آتش در فضای باز تغییر کند که در مواردی حتی باعث خاموشی شعله نیز می‌شود [۱]. در حالتی که آتش در اتاقی باشد که از مجرایی به هوای آزاد مرتبط باشد، گازهای داغ خارج شده و هوای تازه وارد اتاق می‌شود که می‌تواند سبب انحراف شعله‌ی آتش شود. با توجه به میزان مساحت مجرای خروجی، آتش به سمت خاموشی و یا حالت پایدار می‌رود [۲].

در حالت کلی، شبیه‌سازی تمام حالت‌های محتمل در سناریوی آتش در اتاق، نیازمند انتخاب مناسب مدل‌های اغتشاشی، احتراقی، تشعشعی، روش گسسته سازی و سینتیک مناسب است [۳]. تحقیقاتی درزمینه‌ی تأثیر مدل اغتشاشی بر شبیه‌سازی آتش انجام شده است؛ به‌عنوان‌مثال، یوان و همکاران [۴] با استفاده از مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه بزرگ، سه مدل زیر شبکه‌های اسماگورینسکی، ویل و ورمن موردبررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که مدل ویل مدل زیر شبکه‌ی مناسبی است. تحقیقات دیگر نیز به بررسی تأثیر روش گسسته سازی مکانی [۵] و زمانی [۶]، در شبیه‌سازی آتش پرداخته شده است. همچنین، تأثیر تشعشع و سینتیک نیز در تحقیقاتی مطالعه شده‌اند [۷].

در شبیه‌سازی آتش از مدل‌های مختلف استفاده می‌شود که در این میان، مدل‌های احتراقی تأثیر به سزایی در شبیه‌سازی دارند. درواقع نحوه‌ی کنترل پیشرفت احتراق نظیر تولید و یا مصرف گونه‌ها و همچنین میدان دما به‌طور مستقیم و سرعت، فشار، چگالی و ویسکوزیته به‌صورت غیرمستقیم وابسته به مدل احتراقی است؛ بنابراین ضروری است که مدل احتراقی، دقت لازم در شبیه‌سازی آتش را داشته باشد.

در تحقیقات عددی اولیه از مدل‌های ابتدایی نظیر منبع گرمایی حجمی[1] [۸] استفاده می‌کردند که در این مدل احتراقی، واکنش‌های احتراقی دیده نمی‌شود و نمی‌توان گونه‌های واکنشی را به دست آورد. به‌تدریج مدل‌های

1 Volumetric Heat Source (VHS)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: pasdar@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

احتراقی نظیر شکست گردابه[1]، اضمحلال گردابه[2] [۹] و سینتیک بسیار سریع[3] [۱۰] نیز در شبیه‌سازی عددی آتش مورداستفاده قرار گرفت و البته در حال حاضر نیز از این مدل‌های احتراقی زیاد استفاده می‌شود. نقاط ضعفی که این مدل‌های احتراقی دارند، عدم توانایی مدل کردن خاموشی شعله، عدم مدل کردن تمام گونه‌های شرکت‌کننده در احتراق، جوابگویی برای سینتیک تک و یا دومرحله‌ای می‌باشد.

با توجه به نقاط ضعف مدل‌های احتراقی فوق‌الذکر، در تحقیقات جدیدتر، استفاده از مدل‌های احتراقی فلیملت آرام پیشنهاد شده است [۱۱]. با این مدل احتراقی، امکان تخمین تمام گونه‌های شرکت‌کننده در احتراق، با صرف هزینه‌ی محاسباتی اندک فراهم است. ازاین‌رو، این مدل احتراقی در سناریوهای مختلف نظیر آتش استخری[4] و آتش در اتاق استفاده شده است. نکته‌ی مثبت مدل احتراقی فلیملت، داشتن زمان محاسباتی بسیار کم، در مقایسه با مدل‌های احتراقی دیگر است؛ اما این مدل احتراقی در شبیه‌سازی آتش دارای نقاط ضعفی همچون عدم مدل‌سازی خاموشی شعله و عدم در نظر گرفته شدن تشعشع می‌باشد. مطالعات مختلف تأثیر تشعشع را در این مدل احتراقی اعمال کرده‌اند. به‌عنوان‌مثال، لی و همکاران [۱۴] تأثیر تشعشع با دو روش استفاده از معادله انتقال آنتالپی و اعمال تشعشع در تشکیل کتابخانه را پیشنهاد داده و به‌این‌ترتیب نتایج را بهبود می‌دهند.

مدل‌سازی خاموشی شعله، یکی از چالش‌های شبیه‌سازی احتراق است که همه‌ی مدل‌های احتراقی امکان مدل‌سازی آن را ندارند. مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد مدل دیگری است که ضمن دربرداشتن نقاط مثبت مدل احتراقی فلیملت آرام نظیر زمان محاسباتی کم و توان استفاده از سینتیک کامل، می‌تواند خاموشی شعله را نیز مدل کند [۱۲]. زینگ و همکاران [۱۳] با استفاده از مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، دقت سینتیک کاهش یافته[5] را با سینتیک کامل مقایسه کردند. در این مطالعه، سرمشعل نوع دی سانديا[6] با سوخت متان مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که بدون لحاظ کردن تأثیر تشعشع در این مدل احتراقی، نتایج عددی با نتایج تجربی همخوانی دارد. همچنین استفاده از سینتیک کامل در مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، به نسبت سینتیک کاهش یافته، دقت بالاتری دارد.

مرما و کاندلر [۱۴] این مدل احتراقی را در جریان احتراقی تراکم پذیر استفاده کردند. با توجه به اهمیت دما در جریان تراکم پذیر، استفاده از معادله انتقال آنتالپی در کنار مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد توصیه شد. با توجه به اینکه مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در رژیم‌های جریانی مختلف کارایی دارد؛ بنابراین، می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در شبیه‌سازی آتش در اتاق نیز باشد؛ مشروط بر آن‌که دقت لازم را داشته باشد.

در مطالعات محدودی از شبیه‌سازی عددی آتش، از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد استفاده شده است. صفرزاده و همکاران [۱۵] تأثیر اعمال تشعشع بر این مدل احتراقی را با استفاده از مدل تشعشعی جهت‌های گسسته[7] بررسی کردند و مشاهده شد که در اتاق به علت کاهش اکسیژن موجود، دمای شعله افت پیدا می‌کند و درنتیجه اعمال تشعشع تأثیر به سزایی بر نتایج نمی‌گذارد. صفرزاده و همکاران از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد [۱۶] استفاده کردند و گونه‌های مختلف سمی که در آتش‌سوزی تولید می‌شود را مدل کردند. در این تحقیق مشاهده شد که نتایج گونه‌ی مونواکسید کربن، کمتر از ۱۵ درصد، با نتایج تجربی خطای نسبی دارد.

با توجه به مرور مطالعات، می‌توان متوجه شد که مدل احتراقی سهم به سزایی در شبیه‌سازی آتش دارد و سعی بر آن بوده است که با انجام محاسبات کم، جزئیات دقیقی از احتراق و گونه‌های حاصل از آن مدل‌سازی شود. ازاین‌رو در مطالعات عددی اخیر به سمت مدل‌های احتراقی فلیملت تمایل پیدا شده است. از بین مدل‌های فلیملت، مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد با داشتن مزایایی همچون، مدل‌سازی خاموشی آتش، داشتن زمان محاسباتی پایین و امکان استفاده از سینتیک کامل، می‌تواند به‌عنوان یکی از مدل‌های احتراقی بسیار معتبر در شبیه‌سازی آتش مورداستفاده قرار گیرد. بررسی نتایج این مدل در سناریوهای مختلف آتش می‌تواند کارایی این مدل احتراقی را بیش‌ازپیش، نمایان سازد؛ بنابراین لزوم مقایسه‌ی نتایج مدل‌های احتراقی مختلف با مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در سناریوی آتش در اتاق، ازجمله خلأهای مطالعات پیشین است.

در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد که مدل احتراقی کاملی است که جزئیات دقیق گونه‌های خطرناک در آتش را پیش‌بینی می‌کند، میدان سرعت و دما در سناریوی آتش در اتاق، موردبررسی قرار می‌گیرد و نتایج این مدل احتراقی با مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه می‌شود.

1 Eddy Brake Up (EBU)
2 Eddy Dissipation Model (EDM)
3 Infinite Fast Chemistry (IFC)
4 Pool Fire
5 Reduced mechanism
6 Sandia Flame D
7 Discrete Ordinate Method (DOM)

۲- معادلات حاکم

آتش یک جریان احتراقی غیر پیش آمیخته است. با استفاده از روش فیلتر گیری فاور، می‌توان معادلات مربوط به جریان واکنشی نظیر پیوستگی، مومنتوم، انرژی، کسر مخلوط و معادلات توربولانس را فیلتر گیری نمود و در شبیه‌سازی استفاده نمود؛ که در این صورت معادلات کلی حاکم، به‌صورت روابط (۱) تا (۳) می‌شود [۱۷].

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_i}= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial\bar{\tau}_{ij}}{\partial x_i}-\frac{\partial(\bar{\tau}_{u_iu_j})}{\partial x_i}+(\bar{\rho}-\rho_{ref})g_i \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}h_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i h_s)}{\partial x_i}= \frac{D\bar{p}}{Dt}-\frac{\partial\bar{q}_i}{\partial x_i}+\frac{\partial\bar{\tau}_{u_iT}}{\partial x_i}+\bar{\omega}_\tau+S_{rad} \qquad (۳)$$

در روابط (۱) تا (۳)، ρ چگالی مخلوط و ρ_{ref} چگالی مرجع در محیط اطراف هستند. u_i سرعت، p فشار، g شتاب گرانش زمین و h آنتالپی هستند. ω_T نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است و عبارت S_{rad} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی را نشان می‌دهد. $\bar{\tau}_{u_iT}$ بردار شار حرارتی زیرشبکه و $\bar{\tau}_{ij}$, $\bar{q}_i$ به ترتیب تانسور تنش‌های لزجی و بردار شار حرارتی هستند که هرکدام به‌صورت روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند.

$$\bar{\tau}_{ij}=\mu\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k} \qquad (۴)$$

$$\bar{q}_i=-\frac{\mu C_P}{Pr}\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_i} \qquad (۵)$$

در معادلات (۴) و (۵)، μ و C_p به ترتیب ویسکوزیته و ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد. Pr عدد پرانتل هستند که در شبیه‌سازی آتش ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. $\bar{\tau}_{u_iu_j}$ تنش زیر شبکه اغتشاشی مربوط به مومنتوم است که به‌صورت رابطه‌ی (۶) مدل می‌شود [۱۹].

$$\bar{\tau}_{u_iu_j}=\bar{\rho}u_iu_j-\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j=-2\mu_t^{SGS}\tilde{S}_{ij}+\frac{1}{3}\bar{\tau}_{kk} \qquad (۶)$$

$$\tilde{S}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{1}{3}\frac{\partial\tilde{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij} \qquad (۷)$$

$$\bar{\tau}_{kk}=2C_I\bar{\rho}\Delta^2\,|2\tilde{S}_{ij}\tilde{S}_{ij}|\,\delta_{ij} \qquad (۸)$$

$\tilde{S}_{ij}$, δ_{ij} به ترتیب، تانسور نرخ کرنش، تابع دلتا می‌باشند. همچنین در شبیه‌سازی آتش می‌توان از ترم $\bar{\tau}_{kk}$ در رابطه‌ی (۶) صرف‌نظر کرد [۴]. μ_t^{SGS} ویسکوزیته اغتشاشی است که در این مقاله توسط روش زیر شبکه‌ی یک-معادله‌ای مدل می‌شود [۲۰]. در این مدل زیر شبکه، معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی زیر شبکه حل می‌شود و مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به انرژی جنبشی اغتشاشی زیر شبکه به‌صورت روابط (۹) تا (۱۳) تعیین می‌شود [۶].

$$\mu_t^{SGS}=\bar{\rho}C\Delta\sqrt{k_{sgs}} \qquad (۹)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k_{sgs})}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_ik_{sgs})}{\partial x_i}= \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}C_{ak}\Delta\sqrt{k_{sgs}}\frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i}\right)+ P_{k_{sgs}}-D_{k_{sgs}}+B_{k_{sgs}} \qquad (۱۰)$$

$$P_{k_{sgs}}=-\tau_{ij}\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_i} \qquad (۱۱)$$

$$D_{k_{sgs}}=C_*\frac{\bar{\rho}k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \qquad (۱۲)$$

$$B_{k_{sgs}} = -\frac{C}{\sigma_\rho}\Delta\sqrt{k_{sgs}}\left(\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_j}.g_j\right) \quad (۱۳)$$

k_{sgs} انرژی جنبشی اغتشاشی است و هر یک از عبارت‌های $P_{k_{sgs}}, D_{k_{sgs}}, B_{k_{sgs}}$ به ترتیب ترم‌های منبع شناوری، اضمحلال و تولید می‌باشند که توسط معادلات (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌شوند. در این روابط، عبارت Δ معرف اندازه‌ی فیلتر است که به‌صورت $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ به دست می‌آید و همچنین μ_t^{SGS} معرف لزجت توربولانسی می‌باشد که به عبارتی اثرات اغتشاش گردابه‌های کوچک این‌گونه وارد معادلات می‌شود. در معادلات مربوط به مدل زیر شبکه‌ی تک معادله‌ای ضریب C را معمولاً ۰/۰۶۹، $C_{\alpha k} = C / \sigma_k$ و مابقی ضرایب را یک انتخاب می‌کنند [۲۰]. اثر تشعشع، توسط رابطه‌ی (۱۴) در معادله‌ی انرژی اعمال شده است [۲۱].

$$S_{rad} = -4\bar{K}_a E_b + \sum_{i=1}^{n_{rad}} w_i \bar{K}_a \bar{I}_i(\hat{s}_i) \quad (۱۴)$$

در رابطه‌ی (۱۴)، ω_i، I_i و K_a به ترتیب، ضرایب وزنی، میزان تشعشع و ضریب تشعشع در معادله‌ی تشعشع می‌باشند و $E_b, \hat{s}_i$ به ترتیب، جهت‌های گسسته‌سازی و توان تشعشعی جسم سیاه هستند که با توجه به دمای گاز محاسبه می‌شود.

۲- ۱- مدل‌های احتراقی

درصورتی‌که از مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع و اضمحلال گردابه استفاده شود، معادلات انتقال گونه به‌صورت رابطه‌ی (۱۵)، به معادلات اضافه می‌گردد.

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\varphi})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i\tilde{\varphi})}{\partial x_i} = -\frac{\partial\bar{q}_\varphi}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{u_i\varphi}}{\partial x_i} + S_\varphi \quad (۱۵)$$

در رابطه‌ی (۱۵)، φ نشان‌دهنده‌ی کسر جرمی گونه‌های شرکت‌کننده در آتش و $\bar{q}_\varphi$ بردار شار مربوط به کسر جرمی است. همچنین، ترم S_φ ترم تولید در معادله گونه هست که در واکنش تک-مرحله‌ای، با توجه به نرخ انجام واکنش سوخت، محاسبه می‌شود. رابطه‌ی محاسبه‌ی نرخ انجام واکنش سوخت توسط مدل‌های احتراقی سینتیک خیلی سریع و اضمحلال گردابه در جدول ۱ آورده شده است.

در روابط (۱۶) تا (۱۸)، Δt و C_c به ترتیب گام زمانی و ضریب ثابت مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع هستند. همچنین $\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}$ به ترتیب، کسر جرمی اکسیدکننده و سوخت هستند و s نسبت جرمی استوکیومتری هوا به سوخت است. $k_{sgs}, \varepsilon_{sgs}$ نیز به ترتیب، میزان انرژی جنبشه اغتشاشی و نرخ اضمحلال آن است.

جدول ۱. روابط مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه

Table 1. The equation of infinite fast chemistry and eddy dissipation combustion model

مدل احتراقی	روابط
سینتیک بسیار سریع [۱۷]	$\overline{\dot{\omega}''_F} = \bar{\rho}\frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}/s)}{C_c\Delta t}$ (۱۶)
	$\overline{\dot{\omega}''_F} = \bar{\rho}\frac{\min(\tilde{Y}_F, \tilde{Y}_{O_2}/s)}{\tau_{mix}}$ (۱۷)
اضمحلال گردابه [۹]	$\tau_{mix} = \min\left(\underbrace{\frac{k_{sgs}}{C_{EDM}\varepsilon_{sgs}}}_{\tau_{turb}}, \underbrace{\frac{\Delta^2}{C_{diff}\alpha}}_{\tau_{lam}}\right), C_{EDM} = 4, \quad C_{diff} = 2$ (۱۸)

۲- ۱- ۱- مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد

در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد سعی می‌شود، متغیرهایی نظیر کسر جرمی و دما بر اساس مقدار کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش استخراج شوند [۲۲]. به این منظور با استفاده از مدل‌سازی معادلات معروف به فلیملت (معادلات جرم، گونه و آنتالپی در فضای شعله) متغیرهای کسر جرمی و دما بر اساس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش به دست می‌آید [۲۳]. در گام بعدی، کتابخانه‌ی اغتشاشی مربوط به این مدل احتراقی، تشکیل شده و از این کتابخانه در میدان اصلی استفاده می‌شود. به این منظور نیاز است که معادلات انتقال کسر مخلوط، واریانس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش در فضای هندسی حل گردد؛ بنابراین با توجه به ماهیت این مدل احتراقی، روابط (۱۹) تا (۲۱) به دسته معادلات انتقال اضافه می‌گردد و دیگر نیاز به حل معادله انتقال گونه نمی‌باشد [۲۴].

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Z})}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{Z})}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}(D+D_t)\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i}\right) \tag{۱۹}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}Z''^2)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_iZ''^2)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}D_t\frac{\partial Z''^2}{\partial x_i}\right)+2\bar{\rho}D_t\left(\frac{\partial\tilde{Z}}{\partial x_i}\right)^2-\bar{\rho}\tilde{\chi} \tag{۲۰}$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{y}_p)}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{y}_p)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}D_y\frac{\partial\tilde{y}_p}{\partial x_i}\right)+\tilde{\dot{\omega}}_{y_p} \tag{۲۱}$$

در روابط (۱۹) تا (۲۱)، Z کسر مخلوط و $\widetilde{Z''^2}$، D و D_t به ترتیب واریانس کسر مخلوط، ضریب نفوذ آرام و اغتشاشی هستند. $\tilde{y}_p$ تابع پیشرفت واکنش که به‌صورت کسر جرمی بخارآب در نظر گرفته‌شده است. $\tilde{\dot{\omega}}_{y_p}$ عبارت تولید تابع پیشرفت واکنش است که از کتابخانه‌ی مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد فراخوانی می‌شود. همچنین، $\tilde{\chi}$ در رابطه‌ی (۲۰)، متوسط اتلاف اسکالر کسر مخلوط و معرف نرخ اضمحلال نوسانات کسر مخلوط است.

۲- ۲- حل عددی

روش‌های گسسته سازی برای تمامی عبارت‌های جابجایی در معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی زیرشبکه، انتقال انرژی، گونه، انتقال تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن از تقریب مرتبه دو و برای عبارت مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری استفاده شد [۶]. پیمپل به‌عنوان الگوریتم اعمال وابستگی بین سرعت، فشار، دما و پارامترهای کسر مخلوط و واریانس آن اتخاذ شد [۵].

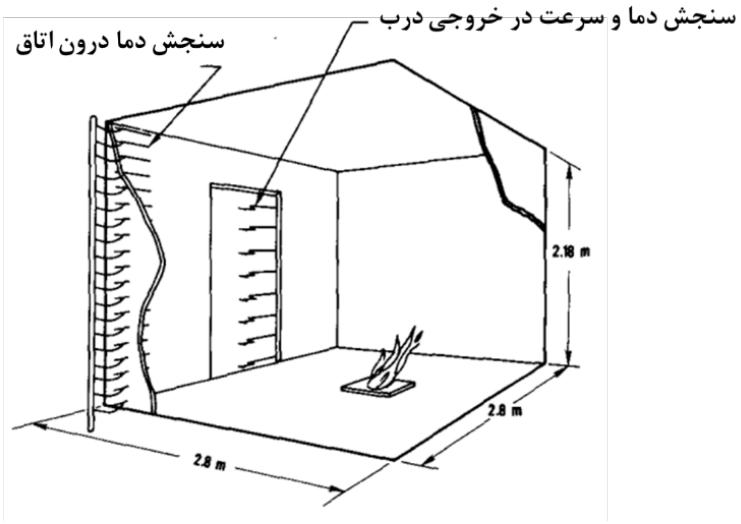
میزان باقیمانده برای معادلات انتقال همچون مومنتوم، فشار، دما و گونه کمتر از 10^{-6} قرار داده شد. با توجه به این که در این مقاله از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است و به منظور دست‌یابی به جواب فیزیکی، مقدار بیشینه عدد کورانت ۰/۸ ($\Delta t\sum_{i=1}^{3}\frac{u_i}{\Delta x_i}\leq 0/8$) لحاظ شد که به طور نسبی معادل با گام زمانی ۰/۰۰۱ می‌شود. به‌منظور تشکیل کتابخانه‌ی آرام برای مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد از نرم‌افزار کمکین استفاده شد و توسط کد نوشته‌شده، کتابخانه‌ی اغتشاشی تهیه شد. برای شبیه‌سازی حالت‌های موردبررسی از نرم‌افزار اپن. فوم استفاده شده و مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد نیز به این نرم‌افزار اضافه‌شده است و سایر مدل‌های احتراقی در خود این نرم‌افزار موجود است. همچنین برای تولید شبکه نیز از همین نرم‌افزار استفاده شد. در حالت کلی، ۱۰۰ ثانیه زمان سپری می‌شود تا آتش به حالت شبه‌پایدار برسد و در مدت ۳۰ ثانیه نتایج متوسط گیری شده و با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

۳- نتایج

در این بخش سناریوی آتش در فضای اتاق مطابق با نتایج تجربی استکلر و همکاران [۲۵] انتخاب‌شده و نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در فضای بسته با حضور دیوار موردبررسی قرار می‌گیرد. به این منظور ابتدا کیفیت شبکه بررسی‌شده و سپس نتایج دما و سرعت مدل احتراق تولیدفلیملت‌منیفولد، با مدل‌های احتراقی دیگر مقایسه می‌شود.

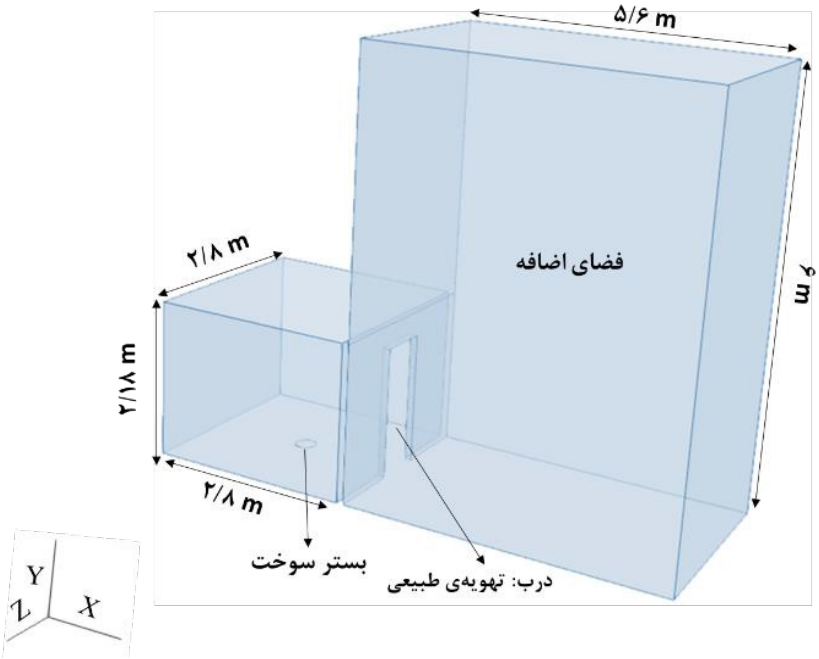
۳- ۱- هندسه و فضای محاسباتی

فضای هندسی نتایج تجربی [۲۵] شبیه شکل ۱ از یک اتاق با ارتفاع ۲۱۸ سانتی‌متر و سطح مقطع ۲۸۰×۲۸۰ سانتی‌متر مربع تشکیل‌شده است. درب اتاق با سطح مقطع ۱۸۰×۷۴ سانتی‌متر مربع برای تهویه‌ی طبیعی لحاظ شده است که از طریق این درب، گازهای داغ خارج و هوای تازه وارد می‌شود. مطابق با این شکل، بستر سوخت در مرکز اتاق با قطر ۳۰ سانتی‌متر تعبیه‌شده است و سوخت مورداستفاده، متان در نظر گرفته شده است. در



شکل ۱. هندسه‌ی موردبررسی در مرجع تجربی [۲۵]

Fig. 1. experimental geometry in reference [24]



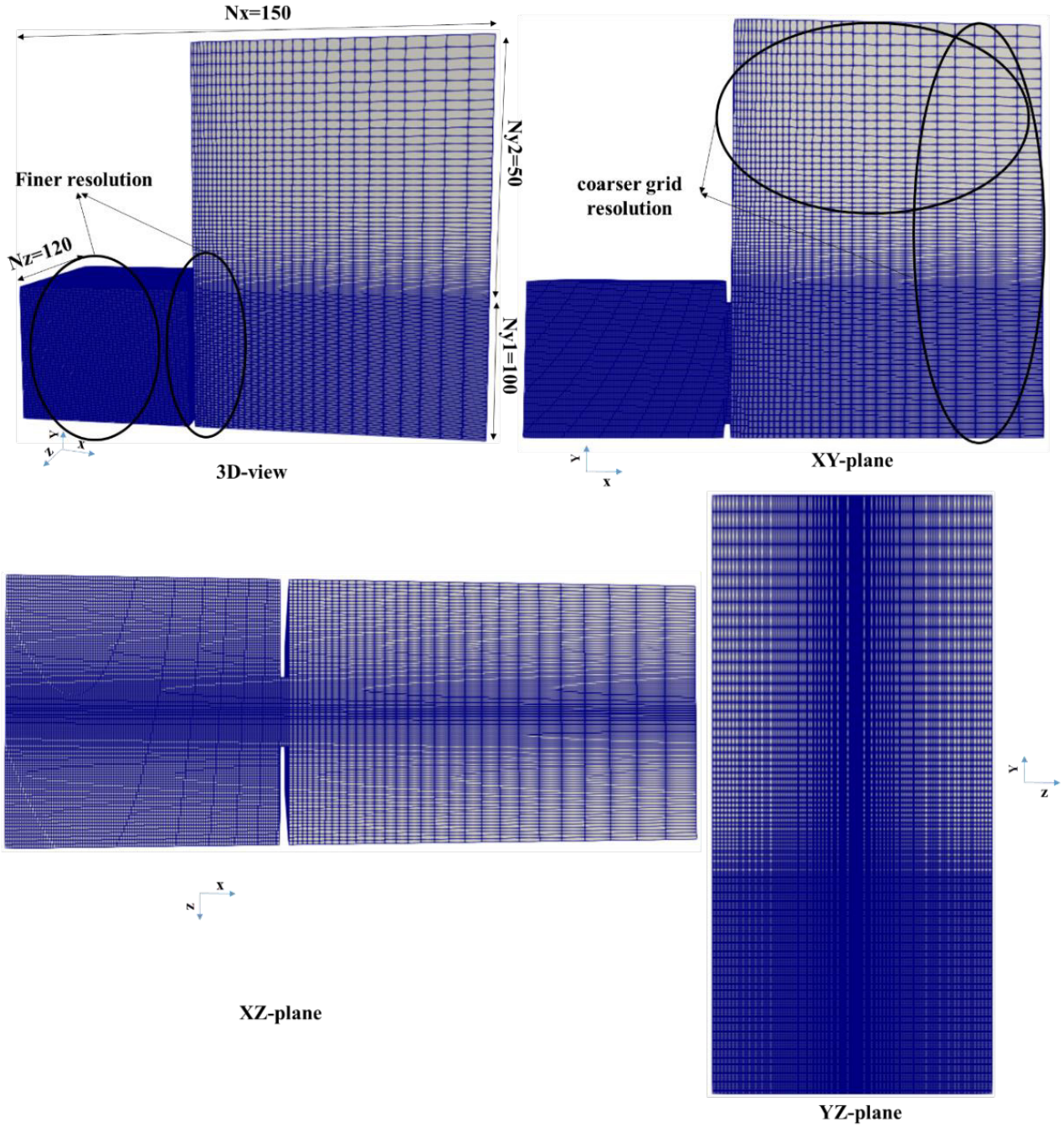
شکل ۲. ابعاد و هندسه‌ی موردبررسی در فضای محاسباتی

Fig. 2. geometry of computational domain

وسط خط مرکزی درب اتاق، حسگرهای اندازه‌گیری سرعت و دما تعبیه شده است. همچنین، در گوشه‌ی سمت چپ نزدیک درب اتاق، حسگرهای دیگری برای اندازه‌گیری دما قرار داده‌شده است.

مطابق با ابعاد هندسه‌ی تجربی، فضای هندسی که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ایجاد شد. به‌منظور کاهش اثر شرط مرزی بر روی نتایج آتش درون اتاق، یک هندسه‌ی اضافه با ابعاد ۲/۸×۶×۵/۶ متر مکعب، مطابق با شکل ۲ نیز به هندسه‌ی موردبحث در شبیه‌سازی اضافه گردید تا به این صورت، ابعاد هندسه‌ی اضافه بر دقت نتایج تأثیر نگذارد.

در شکل ۳، شبکه‌ی مورداستفاده در شبیه‌سازی آتش در فضای اتاق موردنظر و فضای اضافه، آورده شده است. در این سناریو، تعداد



شکل ۳. نمایی از شبکه‌ی محاسباتی مورداستفاده در سناریوی آتش در اتاق از نمای مختلف

Fig. 3. different view of the computational grid used in the compartment fire

۱۲۰×۱۰۰×۱۲۰ مش در فضای اتاق و ۱۲۰×۱۵۰×۳۰ عدد مش در فضای اضافه به‌کاررفته است و درمجموع ۱,۹۸۰,۰۰۰ مش در این هندسه استفاده شد. علاوه بر این مش، دو شبکه‌ی دیگر با تعداد ۱,۰۰۰,۰۰۰ و ۳,۰۰۰,۰۰۰ مش نیز برای بررسی کیفیت شبکه استفاده شده است.

زمانی که آتش در اتاق اتفاق می‌افتد، به‌تدریج آتش از فضای درون اتاق به محیط بیرون زبانه می‌کشد؛ بنابراین نیاز است که درون اتاق و فضای بیرون اتاق (در نزدیکی‌های درب خروج) تعداد کافی مش با تمرکز بیشتر در این نواحی، به‌کاربرده شود. به این منظور، درون اتاق تعداد مش زیادی به‌کاربرده شد و همچنین در نزدیکی درب نیز تمرکز مش به نحوی است که هر چه به سمت زمین و درب خروج نزدیک می‌شود، مش ریزتر می‌شود. در نواحی دور از درب خروجی نیز به‌تدریج تمرکز مش کمتر شده و از شبکه‌های درشت‌تری استفاده می‌شود.

دمای اولیه‌ی ۳۰۰ کلوین به‌عنوان شرایط اولیه حاکم بر مسئله در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که در ابتدا کل فضا را هوا (ترکیب اکسیژن و نیتروژن با کسر جرمی ۰/۲۳۳ و ۰/۷۶۷، به ترتیب) پرکرده است که با تزریق سوخت، آتش شکل می‌گیرد؛ بنابراین، تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن در شرایط اولیه صفر لحاظ شده است. همچنین تمام گازهای موجود در اتاق آتش و فضای اضافه، ساکن با سرعت صفر می‌باشد.

شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش لحاظ گردید و ورودی بستر سوخت هم شرط مرزی سرعت ۰/۰۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. مرزهای اطراف (فضای اضافه) هم به‌صورت شرط مرزی با فشار محیط (۱۰۱ کیلو پاسکال) فرض شد. شرط مرزی حرارتی بر روی دیواره‌ها عایق و در بستر سوخت، دمای ورودی سوخت، ۳۰۰ کلوین لحاظ گردید. در محیط اطراف نیز شرط مرزی ترکیبی استفاده شد؛ به این صورت که در جایی که مکش هواست، دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و در خروج گاز، گرادیان صفر لحاظ گردید [۲۶]. همچنین، شرط مرزی ترکیبی برای کسر جرمی گونه‌ها، کسر مخلوط و تابع پیشرفت واکنش نیز بر روی مرز فضای اضافه اعمال شد [۲۶]. برای راستی آزمایی نتایج از نرخ آزادسازی حرارت ۶۴ کیلووات استفاده شد.

۳- ۲- بررسی شبکه‌ی محاسباتی

به‌منظور مدل‌سازی آتش در اتاق در مطالعه‌ی حاضر، سه نوع شبکه‌بندی ۱,۰۰۰,۰۰۰، ۱,۹۸۰,۰۰۰ و ۳,۰۰۰,۰۰۰ به‌عنوان بررسی تأثیر شبکه‌ی محاسباتی، مدنظر قرارگرفته است. به‌منظور بررسی کیفیت شبکه از شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[1] [۲۷] استفاده شد که طبق رابطه‌ی (۲۲) تعریف می‌شود.

$$LES_{IQ} = \frac{k_{\mathrm{Resolved}}}{\underbrace{k_{\mathrm{Resolved}} + k_{SGS}}_{k_{total}}} \qquad (۲۲)$$

در رابطه‌ی (۲۲)، k_{Resolved} دار انرژی جنبشی اغتشاشی مدل شده به‌طور مستقیم توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و k_{SGS} انرژی جنبشی اغتشاشی زیرشبکه می‌باشد. نیاز است که شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در فضای محاسباتی بالاتر از ۸۰ درصد باشد تا شبکه کیفیت موردنیاز را داشته باشد. در شکل ۴، نتایج شاخص کیفیت برای شبکه محاسباتی ۱,۹۸۰,۰۰۰ در سه مقطع آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر سه مقطع، مقدار شاخص کیفیت در اکثر نقاط این صفحات بالاتر از ۸۰ درصد است و درنتیجه شبکه‌ی محاسباتی مورداستفاده، کیفیت موردنیاز را داراست و به‌عنوان مش اصلی انتخاب شده است که نمایی از این مش در شکل ۳ نشان داده شد.

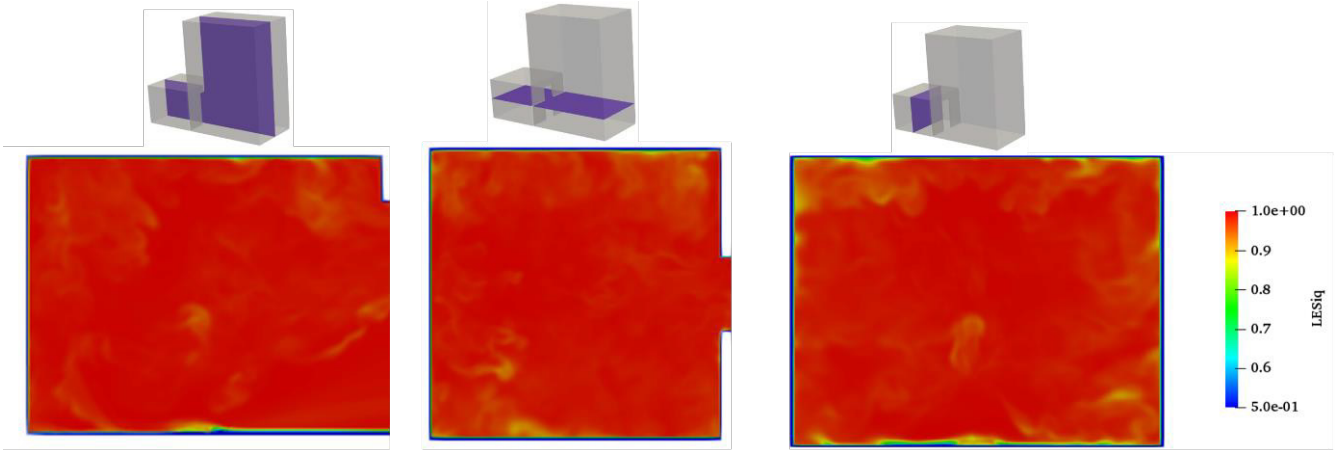
۳- ۳- پیشروی آتش در اتاق

در شکل ۵ کانتور دما برحسب زمان در صفحه‌ی مرکزی اتاق آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در ابتدا (در زمان کمتر از ۱۰ ثانیه) آتش در اتاق همچون آتش استخری اتفاق می‌افتد و آتش در محیط اتاق به‌صورت کاملاً عمودی حرکت می‌کند. به‌تدریج ناحیه‌ی پلوم آتش به ناحیه‌ی سقف نزدیک می‌شود و در نزدیکی سقف اتاق، آتش پخش می‌شود و ناحیه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف را شکل می‌دهند.

به‌مرورزمان، ضخامت این ناحیه در نزدیک سقف بیشتر می‌شود تا اینکه ناحیه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف به نزدیکی درب خروجی می‌رسد و از درب اتاق خارج می‌شود. با خروج دود و محصولات احتراق از بالای درب اتاق، در زمان حدود ۲۰ ثانیه، مکش هوای تازه از پایین اتاق تشدید می‌شود (البته از ابتدای آتش، مکشی توسط آتش اتفاق می‌افتد که به علت افزایش خروج گازهای حاصل از احتراق در طول زمان، این مکش تشدید می‌شود).

با ورود هوای تازه از پایین درب، آتش درون اتاق در معرض باد با سرعت ورودی درب اتاق، قرار می‌گیرد و به‌این‌ترتیب، با گذشت زمان شعله به سمت

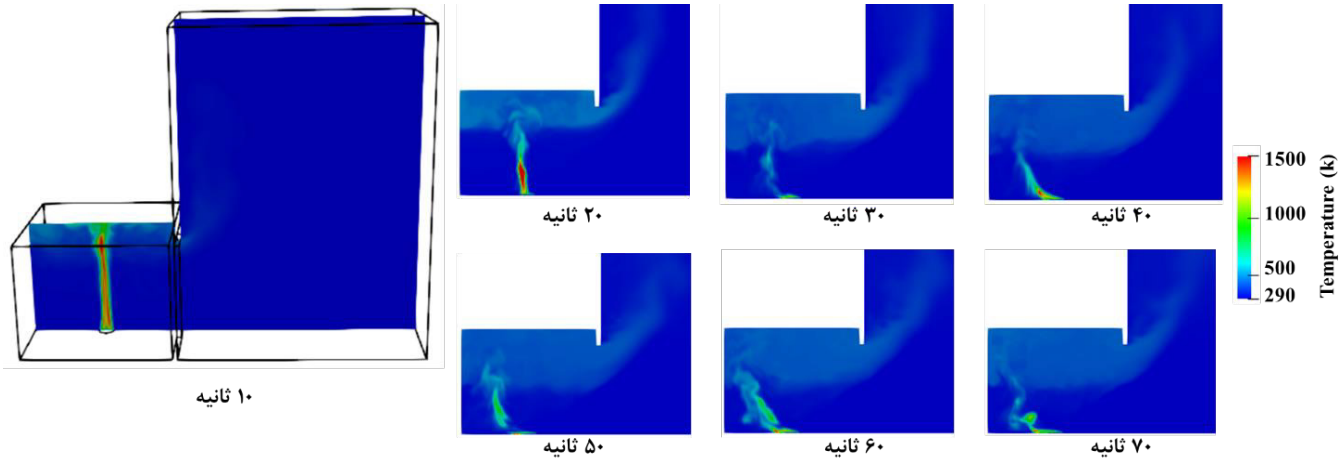
1 Large Eddy Simulation Index Quality (LESiq)



مقطع Z　　مقطع Y　　مقطع X

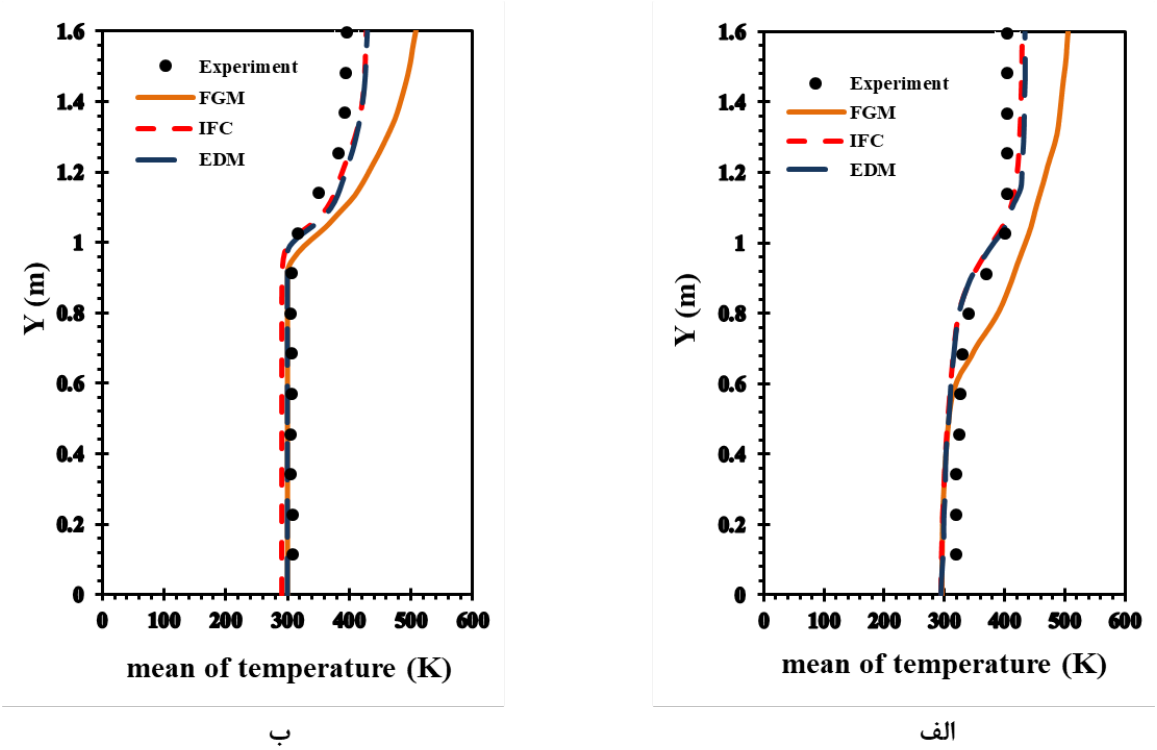
شکل ۴. نتایج شاخص کیفیت شبکه در مقطع‌های مختلف

Fig. 4. LES_iq result in different view



شکل ۵. روند پیشروی آتش در اتاق

Fig. 5. The progress of fire in the room



شکل ۶. دمای متوسط در الف) داخل اتاق و ب) خط مرکزی درب اتاق

Fig. 6. Mean temperature in a) inside the room and b) the center line of the door

خلاف درب منحرف می‌شود (در زمان بین ۲۰–۵۰ ثانیه) و به‌تدریج فضای بیشتری از اتاق (در نزدیکی سقف اتاق) را گازهای داغ فرامی‌گیرد و ضخامت لایه‌ی گاز داغ در نزدیک سقف افزایش می‌یابد تا در زمان ۵۰–۶۰ ثانیه به بعد، دیگر این ضخامت تقریباً ثابت می‌ماند و در زمان بیشتر از ۶۰ ثانیه، رفتار آتش به‌صورت شبه‌پایدار می‌شود؛ به این معنا که شعله‌ی آتش در طول زمان نوسان کرده و به سمت راست و چپ منحرف می‌شود.

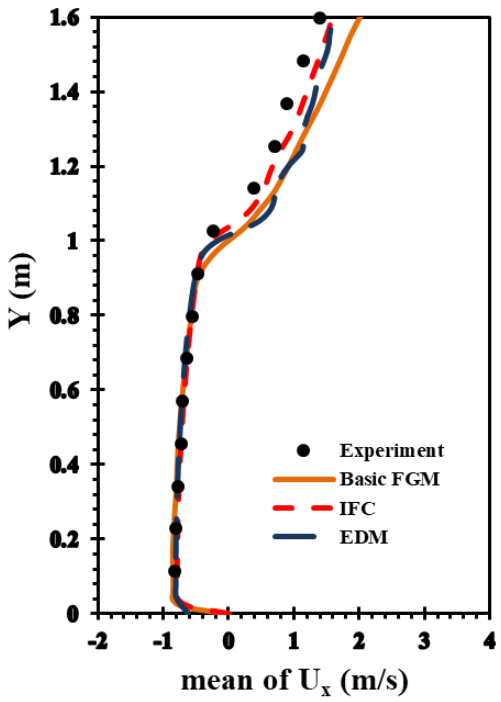
۳– ۴– مقایسه‌ی نتایج مدل‌های احتراقی مختلف

به‌منظور بررسی دقت شبیه‌سازی، نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق (خطی که ۰/۳۰۵ متر از دیواره‌ها فاصله دارد) با نتایج تجربی مرجع [۲۵] در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۶، نتایج عددی دما در خط مرکزی درب اتاق اگرچه با نتایج تجربی همخوانی دارد؛ اما به نسبت داخل اتاق، مقداری اختلاف دارد و در نمودار دما داخل اتاق، همخوانی بیشتری با نتایج تجربی دیده می‌شود.

در شکل ۶، نتایج دما برحسب ارتفاع درون گوشه‌ی اتاق مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، دما با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد تا به ۴۰۰ کلوین در ارتفاع ۱/۶ متر می‌رسد. با توجه به این شکل، نتایج هر سه مدل احتراقی در ارتفاع‌های پایین، بر یکدیگر منطبق هست و با نتایج تجربی همخوانی دارد؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر، نتایج عددی مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارند؛ اما نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، دقت پایین‌تری دارد.

با توجه به شکل ۶، دمای متوسط در پایین درب از ۳۰۰ کلوین شروع شده و با افزایش ارتفاع، زیاد می‌شود تا به حدود ۴۰۰ کلوین در بالای درب می‌رسد. در ارتفاع‌های پایین (ارتفاع کمتر از ۱ متر) که محل ورود هوا به علت مکش است، دمای در حدود دمای محیط (۳۰۰ کلوین) می‌باشد؛ اما در ارتفاع‌های بالا، دما به محدوده‌ی دمای گازهای داغ لایه‌ی نزدیک سقف نزدیک می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، دما در ارتفاع‌های بالا در هر دو نمودار یکسان است؛ چراکه از بالای درب اتاق گازهای محبوس در نزدیکی‌های سقف خارج می‌شود.

با توجه به شکل ۶، نتایج عددی سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع،



شکل ۷. سرعت متوسط در خط مرکزی درب اتاق

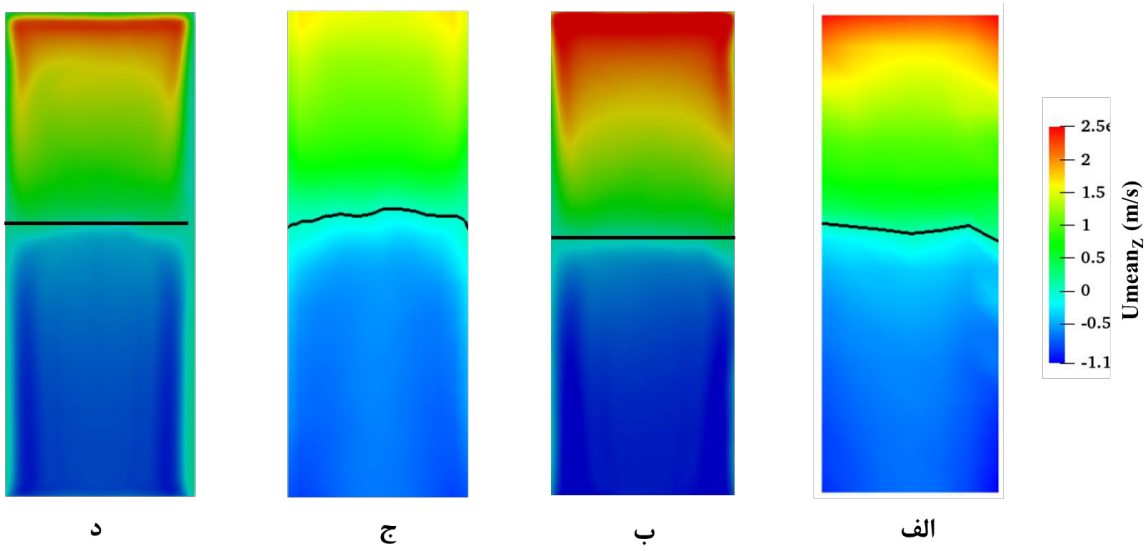
Fig. 7. Mean velocity in the center line of the door

اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد در ارتفاع‌های پایین خط مرکزی وسط درب خروجی، با نتایج تجربی مطابقت دارد؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر که محل خروج گازهای داغ داخل اتاق است، نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع بهتر از نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد شده است. در حالت کلی، با توجه به نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق، مشاهده می‌شود که نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع در این سناریو، بهتر از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد است. همچنین نتایج دو مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی نتایج دمای متوسط بر یکدیگر منطبق هستند.

مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد نتایج دما را بیشتر از نتایج تجربی و مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع پیش‌بینی کرده است. به‌نحوی‌که مقدار خطای نسبی نتایج عددی با نتایج تجربی در خط مرکزی درب اتاق برای مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، ۱۵ درصد و در داخل اتاق کمتر از ۱۲ درصد است. درحالی‌که دقت مدل احتراقی اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی و درون اتاق کمتر از ۵ درصد است.

یکی از عواملی که در پیش‌بینی بیش‌ازحد دما در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد تأثیرگذار است، عدم در نظر گرفتن اثر تشعشع در این مدل احتراقی است (درحالی‌که در مدل احتراقی اضمحلال گردابه، اثر تشعشع وارد شده است). ازاین‌رو مشاهده می‌شود که در ارتفاع‌های پایین که دما کمتر است، نتایج دو مدل احتراقی با یکدیگر فرقی ندارد و نتایج هر دو مدل احتراقی با نتایج تجربی منطبق است؛ اما در ارتفاع‌های بالاتر که دما زیاد می‌شود (و اثر تشعشع مهم می‌شود)، نتایج دو مدل احتراقی از یکدیگر فاصله می‌گیرد.

در شکل ۷، نتایج سرعت متوسط در خروجی درب اتاق برای سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج عددی مربوط به سرعت در سه مدل احتراقی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد؛ اگرچه در ارتفاع‌های بالاتر مقداری اختلاف با نتایج تجربی دیده می‌شود، اما در کل



شکل ۸. کانتور سرعت متوسط در جهت Z در خروجی درب اتاق الف) نتایج تجربی [۲۵] و نتایج عددی ب) مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، ج) مدل احتراقی اضمحلال گردابه و د) مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع

Fig. 8. Mean velocity contour in the Z direction at the door a) Experimental results [8] and numerical results of b) flamelet generated manifold, c) eddy dissipation and d) infinite fast chemistry combustion models

به نسبت نتایج دمای متوسط، نتایج سرعت متوسط با دقت بالاتری با نتایج تجربی همخوانی دارد. به‌طوری‌که در ارتفاع کمتر از ۱/۰ متر، نتایج عددی سه مدل احتراقی، کمتر از ۲ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی وجود دارد و در ارتفاع‌های بالاتر، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی در سه مدل احتراقی وجود دارد.

نکته‌ی دیگری که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در ارتفاع‌های بالاتر نتایج مدل تولید فلیملت منیفولد به نسبت مدل اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع فاصله‌ی بیشتری از نتایج تجربی می‌گیرد (این نکته در منحنی‌های دما نیز مشاهده می‌شد). علت این موضوع نیز اثر مستقیم دما بر روی سرعت است که در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد که دما بالاتر به دست می‌آید، نیروی شناوری با قدرت بیشتری بر گازهای خروجی وارد شده و درنتیجه سرعت در این مدل احتراقی افزایش می‌یابد. همچنین برخلاف نتایج دمای متوسط، دقت مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع در پیش‌بینی سرعت متوسط بهتر از مدل احتراقی اضمحلال گردابه بوده است.

در شکل ۸ کانتور سرعت در خروجی درب برای نتایج عددی سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد آورده شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. با توجه به کانتور سرعت، مشاهده می‌شود که شکل کلی کانتور سرعت نتایج عددی و تجربی شبیه به یکدیگر است؛ اما در ارتفاع‌های بالا مقداری عدم تطابق بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود که این مسئله در مبحث نتایج سرعت متوسط در خط مرکزی این صفحه، بیان شد.

نکته‌ی دیگری که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، در یک ارتفاع سرعت به صفر رسیده و علامت سرعت، تغییر می‌کند. این ارتفاع که خط خنثی را نشان می‌دهد، بیانگر مرز مشترک بین ورودی هوای تازه و خروجی گازهای داغ حاصل از احتراق هست؛ که در ارتفاع بالاتر از این خط، گازهای داغ از درب اتاق خارج‌شده و در ارتفاع‌های پایین‌تر از این خط، هوای تازه‌ی محیط اطراف وارد اتاق آتش می‌شود و بنابراین در سطح مشترک این دو ناحیه، سرعت صفر است.

نتایج تجربی و عددی مربوط به ارتفاع خط خنثی در جدول ۲ که برگرفته از شکل ۸ می‌باشد، آورده شده است. خط خنثی مربوط به نتایج تجربی در ارتفاع ۱/۰۵ متر است و سه مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد به ترتیب، این ارتفاع را ۱/۰۴، ۱/۰۸ و ۱/۰

جدول ۲. نتایج تجربی و عددی مربوط به ارتفاع خط خنثی و دبی هوای ورودی

Table 2. Experimental and numerical results of the height of the neutral line and the inlet air flow rate

	نتایج تجربی	مدل احتراقی اضمحلال گردابه	مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع	مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد
ارتفاع خط خنثی	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۰
خطای نسبی	-	٪ ۲/۹	٪ ۱/۰	٪ ۴/۸
دبی هوای ورودی	۰/۵۶۳	۰/۵۸۳	۰/۵۷	۰/۵۹
خطای نسبی	-	٪ ۳/۶	٪ ۱/۲	٪ ۴

متر به دست آورده‌اند. مدل احتراقی اضمحلال گردابه ارتفاع خط خنثی را بالاتر از نتایج تجربی به دست آورده است؛ اما مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد ارتفاع خط خنثی را کمتر از نتایج تجربی گزارش کرده است؛ اما مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، این ارتفاع را با کمتر از ۱ درصد خطا، منطبق بر نتایج تجربی گزارش کرده است. در حالت کلی نتایج این سه مدل احتراقی با نتایج تجربی در پیش‌بینی ارتفاع خط خنثی، اختلاف چندانی ندارد و بر نتایج تجربی منطبق است.

نتیجه‌ی دیگری که در ۰جدول ۲ آورده شده است، میزان دبی هوای ورودی از درب اتاق می‌باشد. با توجه به جدول ۲، میزان ورودی هوای تازه در تحقیق تجربی، ۰/۵۶۳ کیلوگرم بر ثانیه گزارش‌شده است و نتایج مدل احتراقی اضمحلال گردابه و تولید فلیملت منیفولد با حدود ۴ درصد خطای نسبی، ۰/۵۹ کیلوگرم بر ثانیه به دست آورده‌اند؛ اما مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع، مقدار دبی هوای ورودی را با حدود ۱ درصد خطا، منطبق بر نتایج تجربی گزارش کرده است.

در حالت کلی با مقایسه‌ی نتایج، نکته‌ای مشهود است به این صورت که در شبیه‌سازی که از مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه استفاده شد، اثر تشعشع وارد شده بود؛ اما در مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، اثر تشعشع وارد نشده بود و ازاین‌رو اختلاف‌هایی در نتایج مشاهده شد. ازآنجاکه، یکی از عوامل مهم تأثیرگذار در بهبود نتایج مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد، اعمال تأثیر تشعشع در این مدل احتراقی است، ضروری است که اثر تشعشع بر مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد بررسی شود تا به این ترتیب دقت این مدل احتراقی افزایش یابد. البته لازم به ذکر است در حالت کلی، مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد که توان شبیه‌سازی تمام گونه‌های شرکت‌کننده در حریق را دارد، در بدترین حالت ۱۵ درصد خطا و به طور متوسط (متوسط خطای نسبی دما، سرعت، دبی ورودی و ارتفاع خط خنثی) کمتر از ۱۰ درصد خطا با نتایج تجربی دارد. بنابراین دقت مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، دقت قابل قبولی است (اگر چه در این سناریو، مقداری نتایج این مدل به نسبت سایر مدل‌های احتراقی، دقت پایین‌تری دارد).

نکته‌ی مهمی که عمده دلیل استفاده از این مدل احتراقی در این سناریو است، توانایی این مدل احتراقی در شبیه‌سازی تمامی گونه‌های شرکت کننده در حریق است. این درحالی است که سایر مدل‌های احتراقی مرسوم همچون اضمحلال گردابه و سینتیک بسیار سریع، تنها ۵ گونه را شبیه‌سازی می‌کنند (که از این ۵ گونه، تنها گونه‌ی سمی کربن دی اکسید را می‌توان مدل کرد). در حالت کلی، مزیت مدل تولید فلیملت منیفولد به نسبت سایر مدل‌های احتراقی در تخمین گونه‌های متعدد، با زمان محاسباتی مشابه سایر مدل‌های احتراقی، است. همچنین در تحقیق دیگری از نویسندگان حاضر [۱۶]، توزیع گونه در سناریوی آتش در اتاق و دقت مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، با جزئیات بیشتری، بررسی شده است.

۴- جمع‌بندی

با هدف بررسی اهمیت مدل احتراقی در شبیه‌سازی آتش در اتاق، از مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد استفاده شد و نتایج آن با دو مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه مقایسه شد. به این منظور یک اتاق که تحت تهویه‌ی طبیعی قرار دارد، انتخاب گردید و نتایج در حالتی که نرخ آزادسازی حرارت ۶۲/۹ کیلووات باشد، مطالعه شد. با بررسی نتایج در سناریوی آتش در فضای یک-اتاقه، مشاهده شد که:

- مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه نتایج بهتری نسبت به مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، در مدل کردن دما، داشتند، به‌طوری‌که نتایج مدل احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه، ۱۰ درصد خطای نسبی کمتری نسبت به مدل احتراقی تولید فلیملت منیفولد در پیش‌بینی نتایج دما، دارند.
- با توجه به اعمال تشعشع در مدل‌های احتراقی سینتیک بسیار سریع و اضمحلال گردابه، از جمله عوامل مؤثر در بهبود نتایج این مدل‌ها بوده است (در مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد، اثر تشعشع وارد نشده بود؛ که البته یکی از موارد بهبود دقت مدل احتراق تولیدفلیملت‌منیفولد، اضافه کردن اثر تشعشع بر این مدل احتراقی است).
- همچنین هر سه مدل احتراقی در پیش‌بینی سرعت، دبی هوای ورودی به اتاق و ارتفاع خط خنثی، خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد داشتند که دقت مناسب این مدل‌های احتراقی را نشان می‌دهد.

منابع

[1] G. Yeoh, R. Yuen, S. Chueng, W. Kwok, On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Building and Environment, 38(6) (2003) 771-785.

[2] X. Chen, S. Lu, X. Wang, K.M. Liew, C. Li, J. Zhang, Pulsation behavior of pool fires in a confined compartment with a horizontal opening, Fire technology, 52(2) (2016) 515-531.

[3] G.H. Yeoh, K.K. Yuen, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering, (2009).

[4] A. Yuen, G. Yeoh, V. Timchenko, S. Cheung, T. Chen, Study of three LES subgrid-scale turbulence models for predictions of heat and mass transfer in large-scale compartment fires, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 69(11) (2016) 1223-1241.

[5] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Investigation of Compartment Fire under Maximum and Minimum of Natural Ventilation using FGM Combustion Model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering (2021), (in Persian).

[6] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Evaluation of LES sub-grid scale models and time discretization schemes for prediction of convection effect in a buoyant pool fire, Heat and Mass Transfer, (2020) 1-16.

[7] A.C.Y. Yuen, G.H. Yeoh, V. Timchenko, T. Barber, LES and multi-step chemical reaction in compartment fires, Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 68 (2015) 711-736.

[8] H. Xue, J. Ho, Y. Cheng, Comparison of different combustion models in enclosure fire simulation, Fire Safety Journal, 36(1) (2001) 37-54.

[9] G. Maragkos, B. Merci, Large Eddy Simulations of CH4 Fire Plumes, Flow, Turbulence and Combustion, 99 (2017) 239-278.

[10] Y.-L. Huang, H.-R. Shiu, S.-H. Chang, W.-F. Wu, S.-L. Chen, Comparison of combustion models in cleanroom fire, Journal of Mechanics, 24(3) (2008) 267-275.

[11] S.C.P. Cheung, G.H. Yeoh, A.L.K. Cheung, R.K.K. Yuen, S.M. Lo, Flickering behavior of turbulent buoyant fires using large-eddy simulation, Numerical Heat Transfer; Part A: Applications, 52 (2007) 679-712.

[12] J.A. van Oijen, A. Donini, R.J.M. Bastiaans, J.H.M. ten Thije Boonkkamp, L.P.H. de Goey, State-of-the-art in premixed combustion modeling using flamelet generated manifolds, Progress in Energy and Combustion Science, 57 (2016) 30-74.

[13] Y. Xing, T. Zhang, Z. Tian, J. Li, Y. Yan, Large eddy simulation of a turbulent non-premixed flame based on the flamelet-generated manifolds approach and a reduced mechanism verification, Aerospace Science and Technology, (2020) 105952.

[14] H.F. Mrema, G.V. Candler, Large eddy simulation of supersonic combustion using the flamelet/progress-

variable approach and the evolution-variable manifold approach, AIAA Scitech 2019 Forum, (2019) 1-20.

[15] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Simulation of Pool and Compartment Fire Using Flamelet Generated Manifold With/Without Radiation Coupling, Arabian Journal for Science and Engineering, (2021) 1-10.

[16] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building, International Journal of Thermal Sciences, 159, 106612, (2021).

[17] S.M.J. Razeghi, M. Safarzadeh, H. Pasdarshahri, Comparison of combustion models based on fast chemistry assumption in large eddy simulation of pool fire, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 42(4) (2020).

[18] G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, K. Mazaheri, Evaluation of Induced-Flow in a Two-Room Compartment Fire Using Large Eddy Simulation, Modares Mechanical Engineering, 13(4) (2013) 74-85, (in Persian).

[19] A.C.Y. Yuen, G.H. Yeoh, V. Timchenko, S.C.P. Cheung, T.J. Barber, Importance of detailed chemical kinetics on combustion and soot modelling of ventilated and under-ventilated fires in compartment, International Journal of Heat and Mass Transfer, 96 (2016) 171-188.

[20] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Large eddy simulation on one-meter methane pool fire using one-equation sub-grid scale model, in: MCS, pp. 11-15, (in Persian).

[21] S.C.P. Cheung, G.H. Yeoh, A fully-coupled simulation of vortical structures in a large-scale buoyant pool fire, International Journal of Thermal Sciences, 48 (2009) 2187-2202.

[22] H. Bongers, J.A. Van Oijen, L.P.H. De Goey, Intrinsic low-dimensional manifold method extended with diffusion, Proceedings of the Combustion Institute, 29 (2002) 1371-1378.

[23] L.M. Verhoeven, W.J.S. Ramaekers, J.A. van Oijen, L.P.H. De Goey, Modeling non-premixed laminar co-flow flames using flamelet-generated manifolds, Combustion and Flame, 159 (2012) 230-241.

[24] S. Pohl, G. Frank, M. Pfitzner, J. Matheis, S. Hickel, Flamelet generated manifolds for modeling turbulent non-premixed combustion in OpenFOAM.

[25] K.D. Steckler, J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen, Flow induced by fire in a compartment, in: Symposium (international) on combustion, Elsevier, 1982, pp. 913-920.

[26] G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, S.C.P. Chueng, W.K. Kwok, On modelling combustion, radiation and soot processes in compartment fires, Building and Environment, 38 (2003) 771-785.

[27] G. Maragkos, T. Beji, B. Merci, Advances in modelling in CFD simulations of turbulent gaseous pool fires, Combustion and Flame, 181 (2017) 22-38.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Simulation of Compartment Fire with Flamelet Generated Manifold and Comparison with Other Combustion Models, Amirkabir J. Mech Eng., 54(3) (2022) 493-508.

DOI: 10.22060/mej.2021.19947.7145

این صفحه عمداً خالی است