Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 787-790
DOI:10.22060/mej.2020.18086.6729

Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model

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

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

ABSTRACT: When the fire in the room reaches a critical state, the fire can create hazards for the upper floors. In this paper, different fire cases with more and less natural ventilation than the critical state are discussed, and the temperature, velocity, and toxic species are discussed. A two-floor building is simulated using a large eddy simulation and PIMPLE algorithm and how the fire spreads upstairs is examined. Fuel flow rates are considered at three heat release rates of 500, 1000 and 5000 kW. The flamelet-generated-manifold combustion model is used to analyze toxic species and the results are compared with the experimental results. The relative error is less than 15%. With increasing fuel heat release rates, the upper floor is more exposed to fire hazards such that if the heat release rate is 500 kW, the temperature in the second floor reaches 390 K and the CO species reaches 25 ppm. But if the heat release rate is below 1000 kW, the upper floor will not be at particular risk. Generally, the level of diffusion of CO2 into the second floor is lower than the toxicity level for humans (25-50 ppm) and the second floor is not endangered for CO2 gases.

Review History:

Received: Mar. 18, 2020
Revised: Jun. 30, 2020
Accepted :Aug. 31, 2020
Available Online: Sep. 08, 2020

Keywords:

Compartment fire
Large eddy simulation
Natural ventilation
Flamelet generated manifold combustion model.

1- Introduction

Investigating a fire in a room is one of the most important fire scenarios in a building, which is much more complex than a fire in an open space; This is because the fire is trapped in the room and the rate of release of combustible fuel varies according to the ventilation of the room and the result of heat transfer inside the room. This can trap flammable gases in the room for a while and suddenly release it and cause an explosion [1]. When the room temperature reaches a certain level, flammable gases (from a fire or the release of gases such as methane) begin to burn inside the room. With the ignition of gases inside the room, a flashing phenomenon occurs when the gases are expelled from the room and a volume of unexploded gases is transferred out of the room and ignited outside the room. This phenomenon can create hazards for the surrounding environment, including the upper floors [2] and other rooms of a building [3, 4]; therefore, the study of fire in the room at different heat release rates can partially reveal this phenomenon to prevent its occurrence [5, 6].

However, accurate information on different fire scenarios can be obtained using experimental study; but the details of the temperature field, velocity and dangerous species cannot be easily known in experimental study. Therefore, numerical studies can be used as a tool to study the details of different fire scenarios. One of the concerns of combustion simulation is the use of a model with a suitable computational time as well as high accuracy in simulation of fire, which is one of the gaps in previous studies.

In this study, a two-floor building is investigated using a large eddy simulation method and the Flamelet Generated Manifold (FGM) combustion model, which is a complete combustion model that predicts the exact details of fire-hazardous species. The first floor is the fire room and the second floor is exposed to the combustion gases of the first floor. In order to investigate the hazards status that may occur for the second floor, the temperature field and toxic species on the second floor are examined and compared with the critical values of international standards [7]. Also, in order to comprehensive the results, the rate of heat release in the fire room in different modes of maximum and minimum natural ventilation is examined.

2- Governing Equations

Using the Favre filtering method, can filter the equations of reactive flow such as continuity, momentum, energy and species transport equation. one equation Sub-Grid Scale (SGS) model [8] for sub-grid stress and FGM combustion model was used with GRI reaction mechanism, and the radiation model of the discrete-ordinate approach was used for radiation modeling [9].

*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.

3- Numerical Method

In the present modeling, the fireFoam solver has been used; in the fireFoam solver, the equations are implicitly applied in the program. The value of the local Courant number is considered to be 0.4. For all convective terms in flow equations, turbulent kinetics energy, energy transfer, the transfer of mixture fraction, the second-order scheme has been used.

The verification of the results in the one-room space scenario is performed based on Steckler's experimental results [10]. The fuel used is methane.

A heat release rate of 64 kW is used to verify the results; however, to investigate the effect of heat release rate on fire behavior in a two-floor building, the heat release rate of 500, 1000 and 5000 kW, which are equivalent to less and more than the critical condition of natural ventilation according to the relationship presented by Sun et al. [11], are applied.

In order to investigate the fire behavior in a two-floor building under natural ventilation at different heat release rates, two-room space on two floors are considered according to Fig. 1. This geometry consists of two rooms with experimental geometry characteristics of [10]. In the first floor, the fire can be exited through a door with dimensions of 74 × 180 cm^2, and in the second floor, a window with dimensions of 76 × 83 cm^2 has been installed, which is in the path of the fire, and the fire can enter the second floor through the window.

4- Discussion and Results

Over time, the temperature on the second floor is increased by the exhaust gases from the first floor. At 10 seconds, the temperature near the roof of the second floor reaches about 330 K and the temperature gradually increases until at 40 seconds the temperature on the second floor reaches 380-390 K and approaches the critical temperature range. Therefore, it can be seen that in a situation where the heat release rate is 5000 kW, fire in the building can be dangerous for the upper floors.

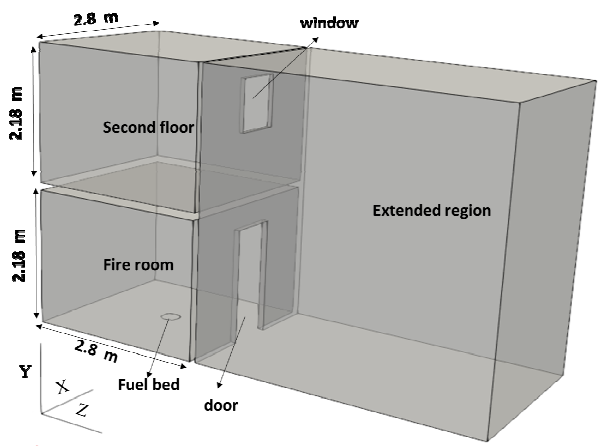


Fig. 1. test case of two-floor building

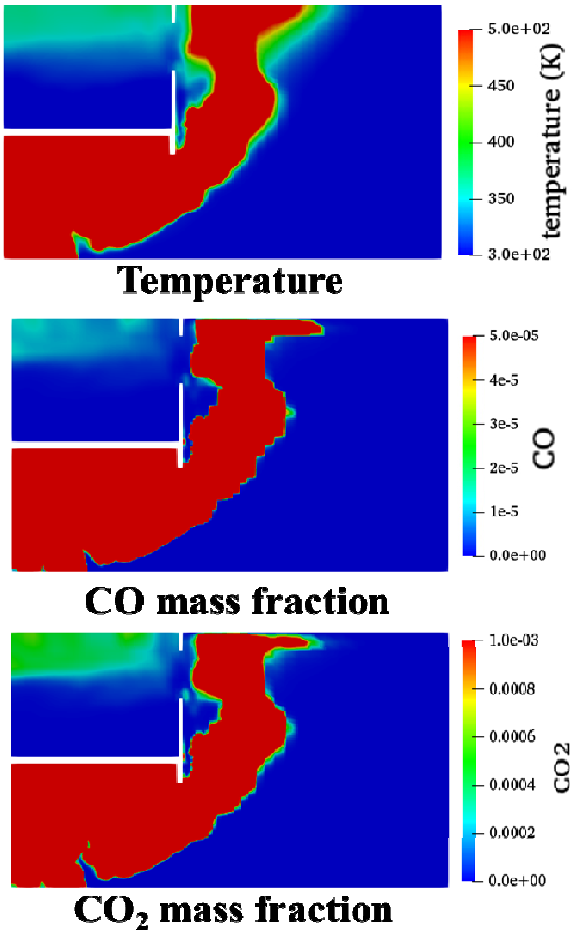


Fig. 2. Temperature field and toxic gases for a heat release rate of 5000 kW at 40s

5- Conclusions

It was observed that when the heat release rate is less than 1000 kW -when natural ventilation is in critical and over-ventilation-, there is no serious problem for the second floor in terms of temperature and toxic species; but in the case of under-ventilation, the second floor is at risk. As carbon monoxide and temperature reach a critical state. For example, when the heat release rate is less than 5,000 kW, the temperature on the second floor reaches 420 K and the toxic carbon monoxide reaches 76 ppm, which is higher than the allowable level for damage. Another important point is that the toxic species of carbon dioxide on the second floor has not reached a critical state for any of the heat release rates.

References

[1] L. Li, Z. Gao, J. Ji, J. Zhu, H. Wang, D. Zhou, Experimental study of fire growth and ejected plume in a cross-ventilation compartment under wind condition, Fire and Materials, 43 (2019) 344-357.

[2] A. Byström, X. Cheng, U. Wickström, M. Veljkovic, Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature,

Building and Environment, 51 (2012) 255-262.

[3] R.K. Janardhan, S. Hostikka, Experiments and Numerical Simulations of Pressure Effects in Apartment Fires, Fire Technology, 53 (2017) 1353-1377.

[4] H. Prétrel, R. Sayada, K. Varrall, L. Audouin, O. Vauquelin, Experimental study based on large-scale smoke propagation fire tests through a horizontal opening connecting two mechanically ventilated compartments, Fire Safety Journal, 90 (2017) 28-43.

[5] H. Wan, Z. Gao, J. Ji, L. Wang, Y. Zhang, Experimental study on merging behaviors of two identical buoyant diffusion flames under an unconfined ceiling with varying heights, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3899-3907.

[6] L. Hu, X. Sun, X. Zhang, F. Ren, Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3859-3867.

[7] NJHealth, (january). Available: https://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-know/.

[8] 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).

[9] 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.

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

[11] X. Sun, L. Hu, X. Zhang, F. Ren, Experimental study on evolution of compartment fire and facade flame through an opening with the fire source attached to a backwall at different elevations, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3919-3926.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Safarzadeh, Gh. Heidarinejad, H. Pasdarshahri., . Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model ,*Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 787-790*

DOI: 10.22060/mej.2020.18086.6729

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ویژه ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۳۳۵ تا ۳۳۵۰
DOI: 10.22060/mej.2020.18086.6729

بررسی عددی آتش در ساختمان در شرایط بیشینه و کمینه تهویه طبیعی با استفاده از مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد

محمد صفرزاده، قاسم حیدری نژاد، هادی پاسدار شهری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه: زمانی که آتش درون اتاق به حالتی بحرانی می‌رسد، می‌تواند برای طبقات بالاتر خطراتی ایجاد کند. در این مقاله حالت‌های آتش با تهویه‌ی بیشتر و کمتر از حالت بحرانی موردبحث قرار می‌گیرد و میدان دما، سرعت و گونه‌های مضر بررسی می‌شود. ساختمانی دو طبقه با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و الگوریتم پیمپل در نرم‌افزار اپن‌فوم برای سه نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات شبیه‌سازی و نحوه‌ی انتشار آتش و دود به طبقه‌ی بالا بررسی می‌شود. به منظور تحلیل گونه‌های سمی، از مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد در شبیه‌سازی استفاده می‌شود و با نتایج تجربی مقایسه می‌گردد. نتایج این مدل احتراقی کمتر از ۱۵ درصد اختلاف با نتایج تجربی دارد. با افزایش آزادسازی حرارت، طبقه‌ی بالا بیشتر در معرض خطرات آتش‌سوزی قرار می‌گیرد؛ مثلاً، اگر میزان آزادسازی حرارت ۵۰۰۰ کیلووات باشد، دما در طبقه‌ی دوم به ۳۹۰ کلوین و گونه‌ی سمی مونواکسید کربن به ۲۵ پی.پی.ام می‌رسد. حالتی که میزان دبی سوخت از ۱۰۰۰ کیلووات پایین‌تر باشد، طبقه‌ی بالا در معرض خطر خاصی قرار نمی‌گیرد. در حالت کلی میزان نفوذ دی‌اکسید کربن به طبقه‌ی دوم کمتر از حد مجاز سمی‌بودن برای انسان (۲۵-۵۰ پی.پی.ام) است و طبقه‌ی دوم ازنظر گاز دی‌اکسید کربن در معرض خطر خاصی قرار نمی‌گیرد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/ ۱۲/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۹/ ۰۴/ ۱۰
پذیرش: ۱۳۹۹/ ۰۶/ ۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/ ۰۶/ ۱۸

کلمات کلیدی:
آتش در ساختمان
شبیه‌ساز گردابه‌های بزرگ
تهویه‌ی طبیعی
مدل احتراقی تولیدفلیملت‌منیفولد.

۱- مقدمه

بررسی آتش در اتاق یکی از مهم‌ترین سناریوهای آتش‌سوزی در ساختمان است که بسیار پیچیده‌تر از حالتی است که آتش در فضای آزاد باشد؛ چراکه آتش در اتاق محبوس شده است و نرخ آزادسازی سوخت قابل‌احتراق با توجه به تهویه اتاق و برآیند انتقال حرارت درون اتاق تغییر می‌کند. این موضوع می‌تواند برای مدتی گازهای قابل اشتعال را در فضای اتاق محبوس کرده و به‌صورت ناگهانی آن را آزاد کرده و انفجار اتفاق بیافتد [۱]. زمانی که دمای اتاق به یک حدی می‌رسد، گازهای قابل اشتعال (حاصل از آتشکافت یا نشر گازهایی همچون متان) درون اتاق شروع به احتراق می‌کنند. با اشتعال گازهای درون اتاق پدیده فلش‌آور[1] اتفاق می‌افتد که گازها از اتاق بیرون زده و حجمی از گازهای محترق‌نشده به بیرون از اتاق منتقل شده و بیرون از اتاق مشتعل می‌شوند. این پدیده می‌تواند خطراتی برای محیط اطراف ازجمله طبقات بالا [۲] و دیگر اتاق‌های یک ساختمان ایجاد کند [۳, ۴]؛ بنابراین بررسی آتش در اتاق در نرخ آزادسازی گرمای مختلف می‌توانند تا حدی این پدیده را برای پیشگیری از وقوع آن آشکار نماید [۵, ۶].

تحقیقات تجربی متعددی در تأثیر میزان دبی سوخت در فضای تک-اتاقی در شرایط مختلف نظیر اتاق که تهویه از در اتاق و یا تهویه از پنجره صورت گیرد، انجام شده است. سون و همکاران [۷] با ارائه رابطه‌ای تحلیلی اشاره می‌کنند که اتاق آتش، سه حالت مختلف برای تهویه وجود دارد؛ یک حالت بحرانی است. حالت دوم که تهویه بیشتر از تهویه‌ی بحرانی است و تهویه به‌صورت مناسب و طبیعی است. حالت سوم که تهویه کمتر از حالت بحرانی است و تهویه به‌کندی انجام می‌گیرد؛ که در این حالت گازهای قابل اشتعال به خارج از فضای اتاق منتقل می‌شود و می‌تواند برای محیط مجاور بسیار خطرناک باشد. رن و همکاران [۸] با لحاظ‌کردن حالت بحرانی بیشینه و کمینه تهویه طبیعی، ساختمان دو طبقه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بررسی کردند که اگر در دو طبقه آتش باشد، فرایند انتقال شعله‌ی آتش در این دو طبقه به چه صورت است. آن‌ها بیان کردند که زمانی که تهویه

1 Flash Over

* 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.

خوب باشد (تهویه بهتر از حالت بحرانی) و طبقه دوم دبی سوخت کمی داشته باشد، در طبقه دوم به علت کمبود اکسیژن آتش خاموش می‌شود. زمانی که مقداری دبی سوخت در طبقه دوم افزایش یابد، ممکن است که گازهای قابل اشتعال به محیط بیرون طبقه دوم انتقال یافته و به‌تبع آن آتش به بیرون از اتاق جابجا شود.

رن و همکاران [۹] در تحقیقی اثر سرعت باد هوا را بر اتاق آتش در دبی‌های سوخت مختلف بررسی کردند. آن‌ها اشاره کردند که دما در یک ارتفاع خاص با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد. درحالی‌که میزان ورود هوا به فضای اتاق افزایش می‌یابد. رن و همکاران [۱۰] در تحقیق دیگری میزان تشعشع شعله‌ی آتش را در حالتی که اتاق آتش تحت سرعت باد مختلف قرار گیرد، بررسی کردند. آن‌ها اشاره کردند که میزان کسر تابش با افزایش مقدار سوخت در بیرون از اتاق کاهش می‌یابد. تنگ و همکاران [۱۱] بیان می‌کنند که با استفاده از تهویه‌ی اجباری، بهتر می‌توان آتش را در فضای اتاق کنترل کرد. داسیکا و همکاران [۱۲] فضایی را در نظر گرفتند که یک ساختمان چندین طبقه در مقابل ساختمان چند طبقه‌ی دیگر قرار دارد. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار اف.دی.اس، مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی اضمحلال گردابه نشر گازهای آلاینده را در شرایطی که یکی از اتاق‌های این ساختمان آتش بگیرد، بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مدل احتراق اضمحلال گردابه در شرایطی که از واکنش دومرحله‌ای استفاده کنند، می‌توانند گونه‌های مضر آلاینده مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن را پیش‌بینی کنند. همچنین اشاره شد که با افزایش سرعت باد هوا ممکن است گازهای مضر به داخل ساختمان‌های مجاور منتقل شود و شرایطی خطرناک را ایجاد کند.

یوان و همکاران [۱۳] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل اغتشاشی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، اثر آتش در دبی‌های مختلف را در یک فضای تک-اتاقی بررسی کردند. آن‌ها میدان دما و گازهای سمی نظیر منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن را بررسی کردند. در این تحقیق گزارش شده است که با افزایش دبی سوخت مقدار منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن افزایش پیدا می‌کند و همچنین شعله‌ی آتش به سمت بیرون از اتاق کشیده می‌شود که می‌تواند برای طبقات دیگر و اتاق‌های مجاور خطرناک باشد. همچنین اشاره می‌شود که مدل احتراقی فلیملت می‌تواند ضمن کاهش هزینه محاسباتی، پیش‌بینی دقیق‌تری از گازهای مضر در فضای اتاق در شرایط آتش‌سوزی داشته باشند.

تلیلی و همکاران [۱۴] اثر ارتفاع بستر سوخت درون فضای تک-اتاقی را تحت تهویه طبیعی بررسی کردند. در این تحقیق اشاره می‌شود که ارتفاع بستر سوخت می‌تواند تأثیر زیادی بر نشر آتش از اتاق داشته باشد؛ به این صورت که با افزایش ارتفاع بستر سوخت میزان سطح مقطعی که گازهای داغ حاصل از احتراق از در خروجی، خارج می‌شوند کاهش می‌یابد. تلیلی و همکاران [۱۵] در تحقیقی دیگر، تأثیر نوع سقف و موقعیت آتش را بر نشر آتش تحت تهویه طبیعی مدل‌سازی کردند. در این تحقیق که تهویه کمتر از حالت بحرانی است، گازهای مضر نظیر منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن، بررسی نشد. آن‌ها نتیجه می‌گیرند که زمانی که موقعیت آتش در وسط اتاق باشد دمای گازهای اتاق بالاتر است و می‌تواند برای محیط اطراف خطرناک‌تر باشد. همچنین زمانی که سقف کروی باشد دمای کلی درون اتاق پایین‌تر می‌آید.

اگرچه می‌توان با استفاده از نتایج تجربی، اطلاعاتی دقیق از سناریوهای مختلف حریق به دست آورد؛ اما از جزئیات میدان دما، سرعت و گونه‌های خطرناک نمی‌توان به‌سادگی اطلاع یافت. ازاین‌رو مطالعات عددی می‌تواند به‌عنوان ابزاری با هدف بررسی جزئیات سناریوهای مختلف حریق استفاده کرد. یکی از دغدغه‌های شبیه‌سازی احتراق، استفاده از مدلی با زمان حل مناسب و همچنین دقت بالا در پیش‌بینی گونه‌های حاصل از احتراق است که این موضوع ازجمله خلأهای مطالعات پیشین است. در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی اف.جی.ام که مدل احتراقی کاملی است که جزئیات دقیق گونه‌های خطرناک در آتش را پیش‌بینی می‌کند، ساختمانی با دو طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبقه‌ی اول، اتاق آتش و طبقه‌ی دوم در معرض گازهای حاصل از احتراق طبقه‌ی اول هست. به‌منظور بررسی مخاطراتی که ممکن است برای طبقه‌ی دوم اتفاق بیفتد، میدان دما و گونه‌های سمی در طبقه‌ی دوم بررسی شده و با مقادیر بحرانی استاندارهای بین‌المللی مقایسه می‌شود. همچنین با هدف جامعیت‌بخشیدن به نتایج، میزان نرخ آزادسازی حرارت در اتاق آتش در حالت‌های مختلف بیشینه و کمینه‌ی تهویه‌ی طبیعی بررسی می‌شود.

۲- معادلات حاکم

در جریان تراکم‌پذیر اغتشاشی از روش فیلترگیری فاور برای حل معادلات انتقال، استفاده می‌شود. در این روش فیلترگیری از طریق رابطه‌ی (۱) انجام می‌شود.

$$\tilde{f}=\frac{\int_{\tau}\rho(t)f(t)dt}{\int_{\tau}\rho(t)dt}=\frac{\overline{\rho f}}{\bar{\rho}} \quad (۱)$$

آتش یک جریان احتراقی غیرپیش‌آمیخته است. با استفاده از روش فیلترگیری فاور، می‌توان معادلات مربوط به جریان واکنشی نظیر پیوستگی، مومنتوم، انرژی، کسر مخلوط و معادلات توربولانس را فیلترگیری نمود و در شبیه‌سازی استفاده نمود؛ که در این صورت معادلات موردنیاز برای مدل‌سازی احتراق به‌صورت روابط (۲) الی (۷) می‌شود [۱۶].

در این روابط ρ چگالی مخلوط، u_i سرعت، p فشار، g شتاب گرانش زمین، h انتالپی و Z کسر مخلوط هستند. $\widetilde{Z''^2}$، $\tilde{y}_p$ و D به ترتیب واریانس کسر مخلوط، تابع پیشرفت واکنش و ضریب نفوذ هستند و $\tilde{\chi}$ در رابطه‌ی (۶)، متوسط اتلاف اسکالر کسر مخلوط و معرف نرخ اضمحلال نوسانات کسر مخلوط است. ω_T نرخ حرارت تولیدشده در اثر احتراق است. عبارت S_{rad} نیز نرخ انتقال حرارت تابشی هست. در معادلات ۳ و ۴ تانسور تنش‌های لزجی و بردار شار حرارتی با استفاده از قوانین نیوتن و فوریه [۱۷] مدل‌سازی می‌شوند.

(۲) پیوستگی

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

(۳) مومنتوم

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

(۴) انرژی

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

(۵) کسر مخلوط

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

(۶) واریانس کسر مخلوط

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

(۷) تابع پیشرفت واکنش

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

۲- ۱- مدل زیرشبکه‌ی تک معادله‌ای

در این مدل طبق روابط ۸ الی ۱۲، معادله‌ی انتقال برای انرژی جنبشی اغتشاشی حل می‌شود و مقدار لزجت گردابه‌ای با توجه به انرژی جنبشی اغتشاشی تعیین می‌شود [۱۸].

$$\mu_t^{SGS}=\bar{\rho}C\Delta\sqrt{k_{sgs}} \quad (۸)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k_{sgs})}{\partial t}+\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_ik_{sgs})}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\bar{\rho}C_{\alpha k}\Delta\sqrt{k_{sgs}}\frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i}\right)+P_{k_{sgs}}-D_{k_{sgs}}+B_{k_{sgs}} \quad (۹)$$

$$P_{k_{sgs}}=-\tau_{ij}\frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_i} \quad (۱۰)$$

$$D_{k_{sgs}}=C_*\frac{\bar{\rho}k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \quad (۱۱)$$

$$B_{k_{sgs}}=-\frac{C}{\sigma_\rho}\Delta\sqrt{k_{sgs}}\left(\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial x_j}.g_j\right) \quad (۱۲)$$

k_{sgs} انرژی جنبشی اغتشاشی است. 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 زیرشبکه‌ی تک‌معادله‌ای ضریب C را معمولاً ۰/۰۶۹، $C_{\alpha k}=C/\sigma_k$ و مابقی ضرایب را یک انتخاب می‌کنند [۱۸].

۲- ۲- مدل احتراقی اف.جی.ام[1]

روش اف.جی.ام که فرضیات ابتدایی آن شبیه روش فلیملت آرام می‌باشد، با استفاده از تغییر متغیر $Z\leftarrow(x,t)$، متغیرهایی نظیر دما و گونه‌ها را در فضایی که متغیرها بر اساس کسر مخلوط بناشده‌اند، به دست می‌آورند. در این روش سعی می‌شود متغیرهایی نظیر کسر جرمی و دما را بر اساس مقدار کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش استخراج کنند. به این منظور با استفاده از مدل‌سازی معادلات معروف به فلیملت (معادلات جرم، گونه و انتالپی در فضای شعله) متغیرهای کسر جرمی و دما را بر اساس کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش

1 Flamelet Generated Manifold (FGM)

به دست می‌آورند. معادلات فلیملت در حالت پایدار به‌صورت معادلات (۱۳)-(۱۶) هستند [۱۹].

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{u})}{\partial x}=-\rho K \tag{۱۳}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{u} Y_i)}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial Y_i}{\partial x}\right)-\rho K Y_i+\dot{\omega}_i \tag{۱۴}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{u} h)}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial h}{\partial x}\right)-\rho K h \tag{۱۵}$$

$$\frac{\partial(\rho \mathrm{u} K)}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial K}{\partial x}\right)-\rho K^2+\rho_2 a^2 \tag{۱۶}$$

در معادلات (۱۳)-(۱۶)، K,u,ρ,x به ترتیب مختصات فیزیکی، چگالی مخلوط، سرعت مخلوط گاز و کشیدگی شعله می‌باشند. $\mu,c_p,\lambda,\dot{\omega},Y_i$ به ترتیب کسر جرمی گونه‌ی i ام، شدت واکنش، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه در فشار ثابت و ویسکوزیته دینامیکی می‌باشند و a نرخ کشیدگی در قسمت اکسیدکننده را مشخص می‌کند. با حل معادلات (۱۳)-(۱۶) برای مقادیر مختلف a فلیملت‌های مختلف به دست می‌آیند و با توجه به اطلاعات فلیملت‌های مختلف می‌توان کتابخانه‌ای بر اساس کسر مخلوط و متغیر واکنشی پیشرفته، تشکیل داد به این منظور متغیر پیشرفت واکنش به‌صورت ترکیبی از گونه‌های مختلف تعریف می‌شود به‌نوعی که در هر فلیملت به‌صورت یکنواخت افزایشی باشد و برای هر فلیملت بتواند مشخصات یکتایی را ارائه دهد [۱۹].

با ارائه‌ی معادلات فلیملت ابتدا واکنش‌های شیمیایی احتراقی در فضای اول توسط نرم‌افزار کمکین[1] محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از تکنیک متوسط‌گیری آماری این داده‌ها تبدیل به داده‌های قابل‌استفاده در فضای فیزیکی می‌شود (باید توجه شود که در روش اف.جی.ام متوسط‌گیری بر بازه‌ی کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش انجام می‌شود) که اصطلاحاً این مرحله را ایجاد کتابخانه اف.جی.ام می‌نامند که حاوی اطلاعات مناسب از فضای اول برای استفاده در فضای فیزیکی است. از طرف دیگر در فضای دوم کمیت‌های کسر مخلوط و متغیر پیشرفت واکنش از طریق حل معادله انتقال این دو پارامتر، یعنی معادله‌ی (۵) و (۷)، محاسبه می‌شوند و با توجه به مقدار این دو پارامتر در هر سلول از داده‌های فضای اول استفاده می‌شود و مقادیر پارامترهای واکنشی نظیر کسر جرمی و دما تخمین زده می‌شود.

۲- ۳- مدل تشعشعی

مدل تشعشعی جهات گسسته[2] در نظر گرفته‌شده است. اثر تشعشع توسط رابطه‌ی (۱۷) در معادله‌ی انرژی اعمال شده است [۲۰].

$$S_{rad}=-4\bar{K}_a E_b+\sum_{i=1}^{n_{rad}} w_i \bar{K}_a \bar{I}_i(\hat{s}_i) \tag{۱۷}$$

در رابطه‌ی (۱۷)، w_i، I_i و K_a ضرایب وزنی، جهت‌های گسسته‌سازی و ضریب تشعشع در معادله‌ی تشعشع می‌باشند.

۲- ۴- حل عددی

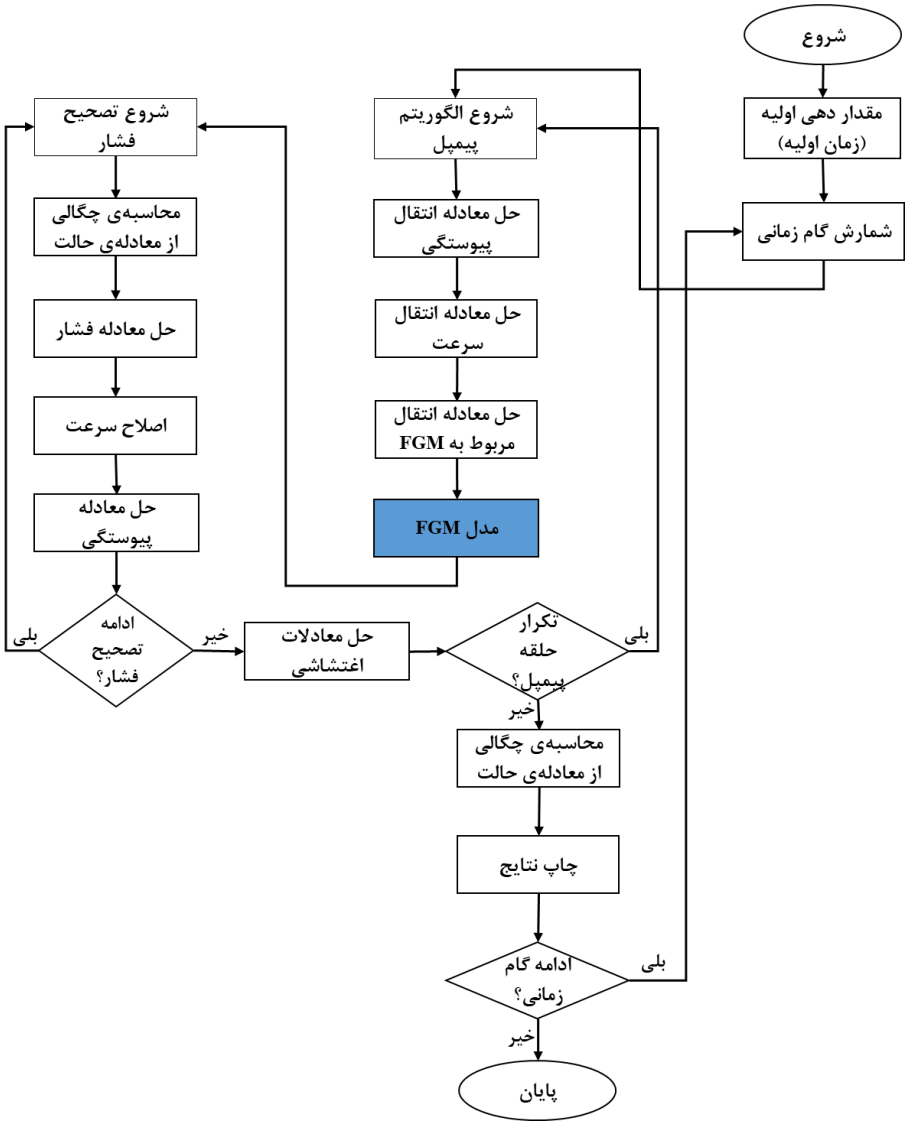
راستی‌آزمایی نتایج در سناریوی فضای تک-اتاقی بر اساس نتایج تجربی استکلر [۲۱] انجام می‌شود. سوخت مورداستفاده متان در نظر گرفته شد و روش‌های گسسته‌سازی برای تمامی عبارت‌های جابجایی در معادلات اندازه حرکت، انرژی جنبشی زیرشبکه، انتقال انرژی، انتقال تابع پیشرفت واکنش، کسر مخلوط و واریانس آن از تقریب مرتبه دو و برای عبارت مشتق زمانی در تمام معادلات از روش اویلری استفاده شد.

پیمپل به‌عنوان الگوریتم اعمال وابستگی بین سرعت، فشار، دما و پارامترهای کسر مخلوط و واریانس آن اتخاذ شد که الگوریتم کلی در شکل ۱ آورده شده است. بیشینه عدد کورانت[3] ۰/۸ لحاظ شد و میزان باقیمانده برای سرعت، فشار، دما و گونه کمتر از 10^{-6} قرار داده شد. سیستم مورداستفاده یک دستگاه کامپیوتر با سیستم حافظه مشترک به میزان ۴ گیگابایت و ۱۶ پردازشگر اینتل-کورای ۵- ۲۴۰۰[4] با فرکانس ۳/۱ گیگاهرتز که هرکدام ۴ هسته حقیقی دارند، استفاده‌شده است. سینتیک کامل جی.آر.آی[5] با ۵۳ گونه و ۳۲۵ واکنش استفاده شد.

برای شبیه‌سازی حالت‌های مورد بررسی از نرم‌افزار اپن.فوم استفاده شده و مدل احتراقی اف.جی.ام در حلگری جدید به این نرم‌افزار اضافه شده است. در حالت کلی با توجه به میزان دبی سوخت،

1 CHEMKIN

2 Discrete Ordinate Method (DOM)
3 Courant Number
4 Intel-core 5-2400
5 GRI



شکل ۱. فلوچارت حلگر مورد استفاده در شبیه‌سازی

Fig. 1. Solver flowchart used in simulation

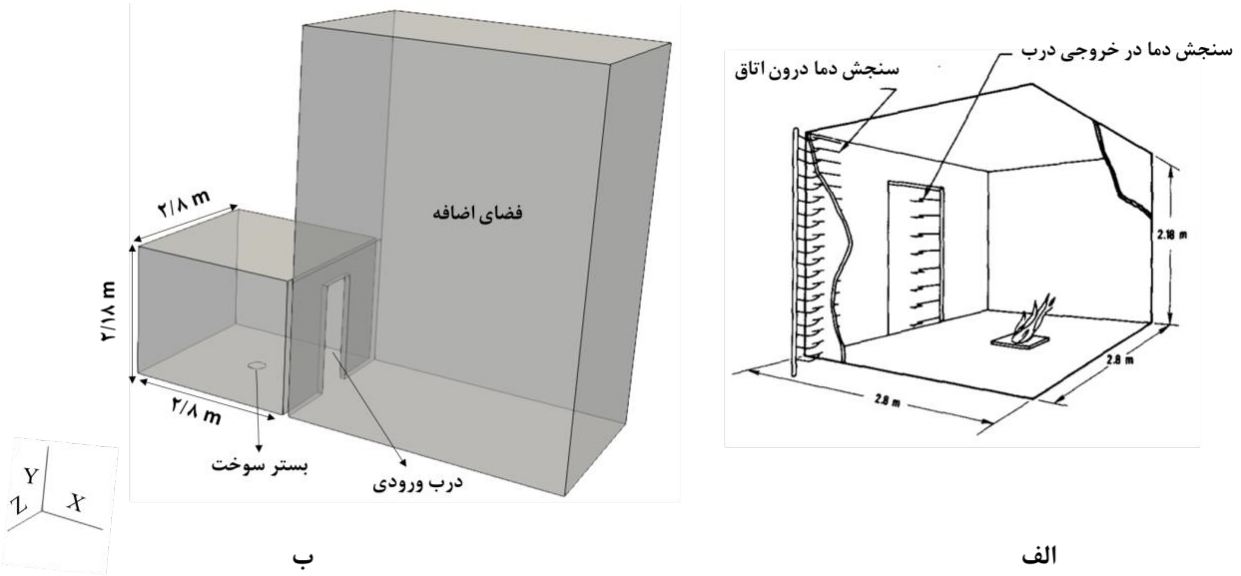
۳۰-۵۰ ثانیه زمان سپری شد تا آتش به حالت شبه‌پایدار برسد و بعد از آن به مدت ۱۰ ثانیه نتایج متوسط‌گیری شده و تحلیل می‌شوند.

۲- ۵- هندسه و فضای محاسباتی

فضای هندسی نتایج تجربی [۲۱] شبیه شکل ۲-الف از یک اتاق با ارتفاع ۲۱۸ سانتی‌متر و سطح مقطع ۲۸۰×۲۸۰ سانتی‌متر مربع تشکیل‌شده است. درِ اتاق با سطح مقطع ۱۸۰×۷۴ سانتی‌متر مربع برای تهویه‌ی طبیعی لحاظ شده است. بستر سوخت در مرکز اتاق با قطر ۳۰ سانتی‌متر تعبیه شده است. به‌منظور کاهش اثر شرط مرزی بر روی نتایج آتش درون اتاق، یک هندسه‌ی اضافه مطابق با شکل ۲-ب نیز به هندسه‌ی موردبحث در شبیه‌سازی اضافه گردید تا به این صورت نتایج مستقل از اعمال شرط مرزی در فضای آزاد باشند.

در جدول ۱ شرایط اولیه و مرزی حاکم بر شبیه‌سازی آورده شده است. با توجه به این جدول، شرط مرزی دیواره‌ها عدم لغزش لحاظ گردید و ورودی بستر سوخت هم شرط مرزی سرعت در نظر گرفته شد. هوای اطراف هم به‌صورت شرط مرزی با فشار محیط ۱۰۱ کیلو پاسکال فرض شد. شرط مرزی حرارتی و گونه‌ی محیط اطراف، هوا (ترکیبی از اکسیژن و نیتروژن) با دمای ۳۰۰ کلوین و دمای سوخت ورودی ۳۰۰ کلوین لحاظ گردید.

برای راستی‌آزمایی نتایج از نرخ آزادسازی حرارت ۶۴ کیلووات استفاده شد؛ اما برای بررسی اثر نرخ آزادسازی حرارت بر رفتار آتش در ساختمان دو طبقه، میزان نرخ آزادسازی حرارت سوخت نیز با



شکل ۲. ابعاد و هندسه‌ی مورد بررسی در الف) مرجع تجربی [۲۱] و در ب) شبیه‌سازی

Fig. 2. Dimensions and geometry studied in a) experimental reference [21] and in b) simulation

جدول ۱ . شرایط مرزی و اولیه استفاده شده در شبیه‌سازی

Table 1. Fuel flow rate for different cases

		سرعت (متر بر ثانیه)	دما (کلوین)	کسر مخلوط	تابع پیشرفت واکنش
شرایط مرزی	بستر سوخت	۰/۰۲۰	۳۰۰	۱	۰/۱۲
	دیواره‌ها	۰	گرادیان صفر	گرادیان صفر	گرادیان صفر
	محیط اطراف	گرادیان صفر	گرادیان صفر (خروج گاز) ۳۰۰ (ورود هوا)	گرادیان صفر (خروج گاز) ۰ (ورود هوا)	گرادیان صفر (خروج گاز) ۰ (ورود هوا)
شرایط اولیه		۰	۳۰۰	۰	۰

جدول ۲. میزان دبی سوخت برای حالت‌های مختلف

Table 2. Boundary conditions and initial value used in simulation

	نرخ آزادسازی حرارت (کیلووات)	میزان سرعت سوخت (متر بر ثانیه)
حالت ۱	۵۰۰	۰/۲۰۶۲
حالت ۲	۱۰۰۰	۰/۴۲۱۴
حالت ۳	۵۰۰۰	۲/۰۶۲

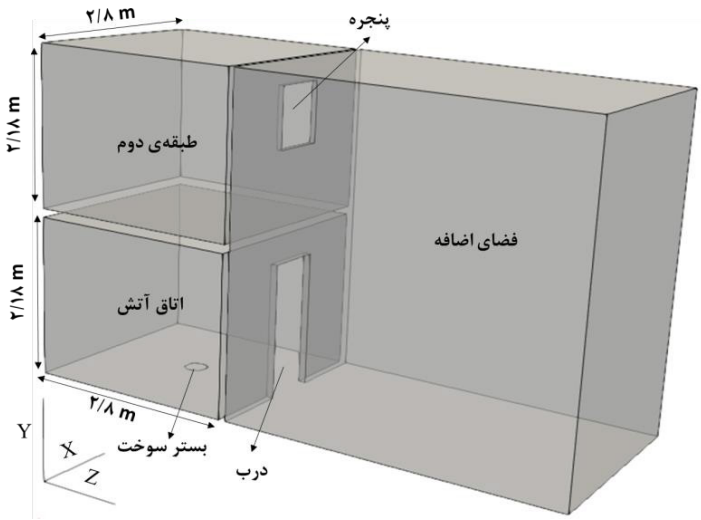
توجه به جدول ۲ معادل با حالت کمتر و بیشتر از حالت بحرانی

$$\dot{Q}_{cr} = 1500\,A\sqrt{H} \qquad (۱۸)$$

تهویه‌ی طبیعی بر طبق رابطه‌ی ارائه‌شده توسط سان و همکاران [۷] به‌صورت رابطه‌ی (۱۸)، اعمال گردید.

در رابطه‌ی (۱۸)، A و h به ترتیب سطح مقطع ورودی و ارتفاع درب اتاق آتش است. $\dot{Q}_{cr}$ حالت بحرانی نرخ آزادسازی حرارت را بین حالت‌های بیشینه و کمینه تهویه‌ی طبیعی در اتاق آتش را نشان می‌دهد که واحد آن در رابطه‌ی (۱۸) کیلووات است.

به‌منظور بررسی رفتار آتش در ساختمان دو طبقه تحت تهویه‌ی طبیعی در نرخ آزادسازی حرارت مختلف، فضای دو-اتاقی در دو طبقه



شکل ۳. ابعاد و هندسه‌ی مورد بررسی در ساختمان دو طبقه

Fig. 3. Dimensions and geometry studied in a two-floor building

مطابق شکل ۳ لحاظ گردید. این هندسه از دو اتاق با مشخصات هندسه‌ی تجربی [۲۱] تشکیل‌شده است. در طبقه‌ی اول آتش از طریق درب با ابعاد ۱۸۰×۷۴ سانتی‌متر مربع می‌تواند خارج شود و در طبقه‌ی دوم یک پنجره با ابعاد ۷۶×۸۳ سانتی‌متر مربع تعبیه شده است که در مسیر آتش است و آتش می‌تواند از پنجره وارد طبقه‌ی دوم شود.

۳- نتایج

در قسمت نتایج ابتدا شبکه‌ی محاسباتی بررسی می‌شود، سپس دقت شبیه‌سازی با نتایج تجربی [۲۱] مقایسه شده و در ادامه آتش در فضای ساختمان دو طبقه در نرخ آزادسازی‌های حرارت مختلف بررسی می‌شود.

۳- ۱- بررسی شبکه‌ی محاسباتی

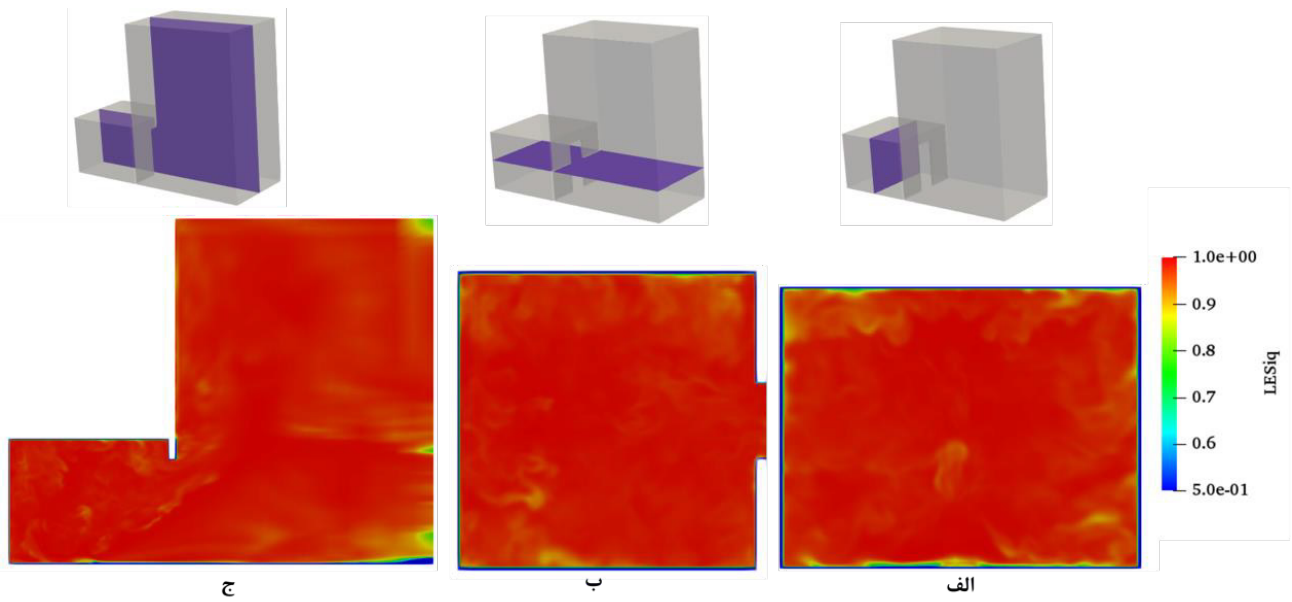
زمانی که از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شود، پارامتری به نام شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[1] که به‌صورت تقسیم مقدار انرژی جنبشی مدل‌سازی بر انرژی جنبشی اغتشاشی کل تعریف می‌شود، اتخاذ می‌گردد تا کیفیت شبکه بررسی شود. از این پارامتر در در مراجع متفاوتی ازجمله [۲۲-۲۴] در مدل‌سازی آتش استفاده شده است. این درصد به صورت رابطه (۱۹) تعریف می شود.

$$LES_{IQ} = \frac{k_{\mathrm{Re}solved}}{\underbrace{k_{\mathrm{Re}solved} + k_{SGS}}_{k_{total}}} \qquad (۱۹)$$

در رابطه‌ی (۱۰) $k_{\mathrm{Re}solved}$ مقدار انرژی جنبشی اغتشاشی مدل‌شده به طور مستقیم توسط روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و k_{SGS} انرژی جنبشی اغتشاشی زیرشبکه می‌باشد. شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توسط پوپ ارائه شد [۲۳] و نیاز است که در فضای محاسباتی بالاتر از ۸۰ درصد باشد تا شبکه کیفیت موردنیاز را داشته باشد.

به منظور مدل‌سازی آتش استخری مطالعه‌ی حاضر، سه نوع شبکه بندی ۱۰۰۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰۰۰ به عنوان بررسی تاثیر شبکه‌ی محاسباتی مد نظر قرار گرفته است و مش دومیلیون به‌عنوان مش اصلی انتخاب‌شده است. در شکل ۴ نتایج شاخص کیفیت برای ۲ میلیون شبکه محاسباتی در سه مقطع آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در هر دو شبکه مقدار شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، در اکثر نقاط این صفحه (صفحه‌ی میانی که آتش در آن قرار دارد) بالاتر از ۸۰ درصد است و

1 Large Eddy Simulation Index Quality (LESiq)



شکل ۴ . نتایج شاخص کیفیت روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در الف) مقطع x، ب) مقطع y و ج) مقطع z

Fig. 4. LESiq results in a) x, b) y and c) z planes

درنتیجه شبکه‌ی محاسباتی مورداستفاده، کیفیت موردنیاز را داراست.

۳- ۲- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور بررسی دقت شبیه‌سازی، نتایج دمای متوسط در خط مرکزی درب خروجی با نتایج تجربی [۲۱] در شکل ۵ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل ۵، نتایج دما در خط مرکزی درب اتاق اگرچه با نتایج تجربی همخوانی دارد اما به نسبت داخل اتاق، مقداری اختلاف دارد؛ اما در داخل اتاق همخوانی بیشتری با نتایج تجربی دیده می‌شود. مقدار خطای نسبی نتایج عددی با نتایج تجربی در خط مرکزی درب اتاق، ۱۵ درصد و در داخل اتاق کمتر از ۱۲ درصد است.

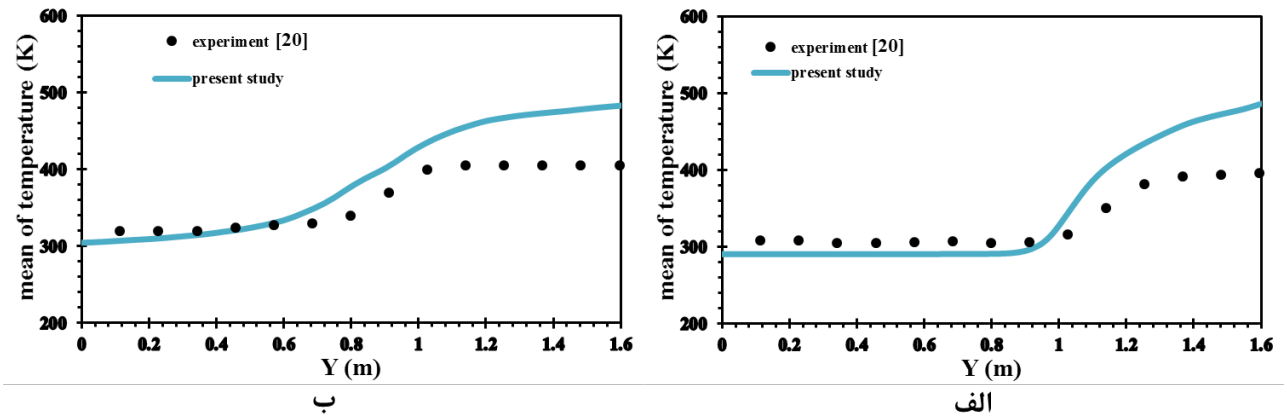
در شکل ۶، نتایج سرعت متوسط در خروجی درب اتاق نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج سرعت عددی با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد؛ اگرچه در ارتفاع‌های بالاتر مقداری اختلاف با نتایج تجربی دیده می‌شود، اما در کل به نسبت نتایج دمای متوسط، نتایج سرعت متوسط با دقت بالاتری با نتایج تجربی همخوانی دارد. به‌طوری‌که در ارتفاع کمتر از ۱/۰ متر، نتایج عددی کمتر از ۲ درصد خطای نسبی با نتایج تجربی دارد.

در شکل ۷ کانتور سرعت در خروجی در آورده شده است و با نتایج تجربی مقایسه شده است. با توجه به دو کانتور مشاهده می‌شود که شکل کلی دو کانتور سرعت شبیه به یکدیگر است؛ اما در ارتفاع‌های بالا مقداری عدم تطابق بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود که این مسئله در شکل ۶ که خط مرکزی این صفحه است، بیان شد. نکته‌ی دیگری که در شکل ۶ و ۷ 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.

در نتایج تجربی، طبق جدول ۳ که برگرفته از شکل ۷ می‌باشد، خط خنثی در ارتفاع ۱/۰۲۳ متر است و نتایج تجربی خط خنثی را با ۲/۳ درصد خطا در ارتفاع ۱/۰ متری پیش‌بینی کرده است. نتیجه‌ی دیگری که در جدول ۳ آورده شده است، میزان دبی گازهای خروجی از درب اتاق می‌باشد. با توجه به جدول ۳ میزان خروجی گازهای حاصل از احتراق در تحقیق تجربی ۰/۵۶۳ کیلوگرم بر ثانیه گزارش شده است و در این کار عددی با ۱۵ درصد خطای نسبی، ۰/۶۵ کیلوگرم بر ثانیه محاسبه‌شده است.

۳- ۳- شکل‌گیری آتش در ساختمان برای نرخ آزادسازی حرارت مختلف

در زمان اولیه درون اتاق، به‌طور کامل از هوای تازه پر شده است. به‌تدریج سوخت متان از بستر سوخت وارد اتاق شده و با مخلوط‌شدن با اکسیژن هوا محترق می‌شود. گازهای داغ حاصل از احتراق که گرم



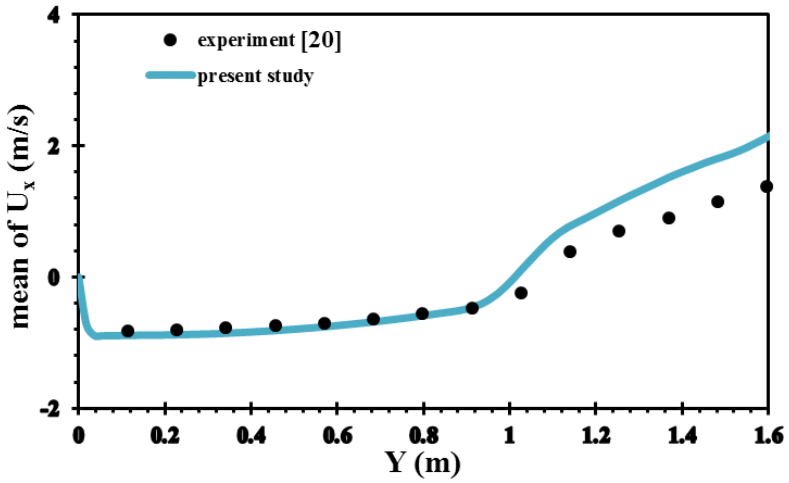
شکل ۵. دمای متوسط در الف) خط مرکزی درب اتاق ب) داخل اتاق

Fig. 5. Mean temperature in a) the central line of the doorway and b) inside the room

جدول ۳. مختصات خط خنثی و دبی خروجی از درب اتاق

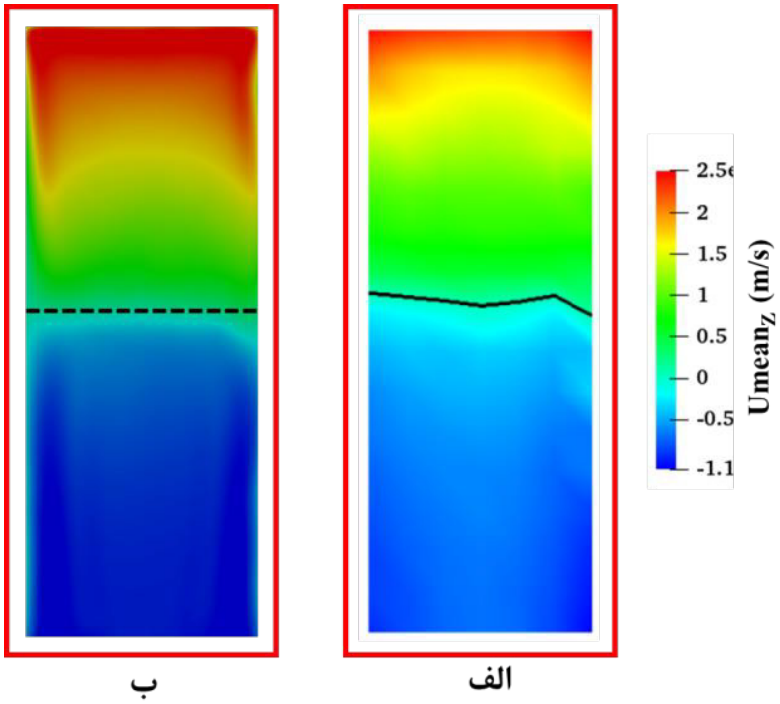
Table 3. Neutral line coordinates and output flow rate from the doorway

	نتایج تجربی [۲۱]	نتایج عددی
مختصات خط خنثی (متر)	۱/۰۲۳	۱/۰
خطای نسبی مختصات خط خنثی	-	۲/۳ درصد
دبی گاز خروجی (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۵۶۳	۰/۶۵
خطای نسبی دبی گاز خروجی	-	۱۵ درصد



شکل ۶. سرعت متوسط در خط مرکزی درب اتاق

Fig. 6. Mean velocity in the central line of the doorway



شکل ۷. کانتور سرعت متوسط در جهت z در خروجی درب اتاق الف) نتایج تجربی [۲۱] و ب) نتایج عددی

Fig. 7. Mean velocity contour in the z direction at the exit of the doorway a) Experimental results [21] and b) Numerical results

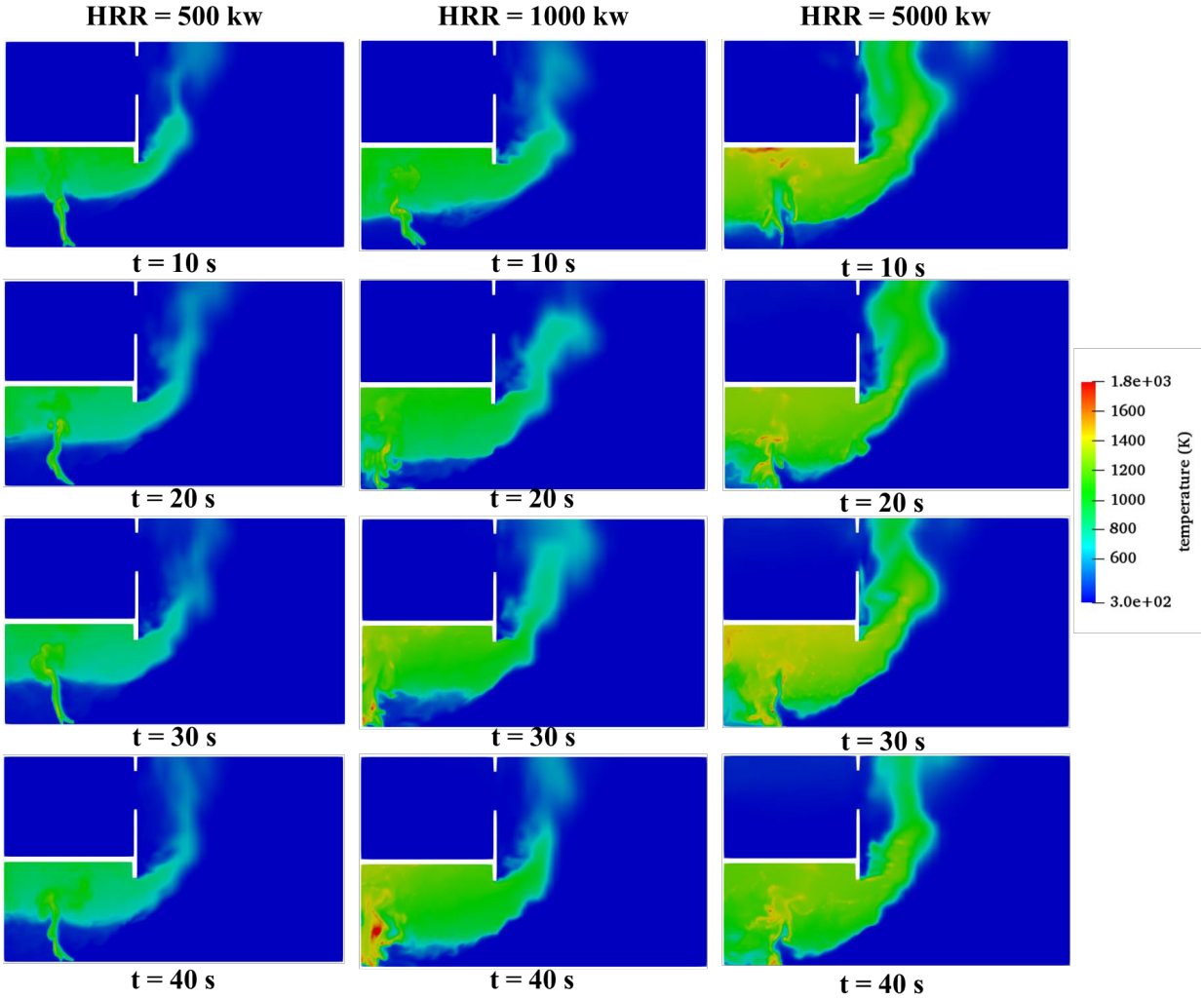
شده، چگالی آن کم شده و به سمت سقف اتاق منتقل می‌شوند، به‌تدریج تشکیل یک لایه‌ای از گازهای داغ حاصل از احتراق را در نزدیکی سقف اتاق می‌دهند؛ تا آنجا که عمق این لایه به خروجی درب برسد. تمامی این مراحل برای تمام نرخ آزادسازی حرارت مختلف، طبق شکل ۸، قبل از ۱۰ ثانیه انجام می‌شود.

زمانی که لایه‌ی هوای داغ محصولات احتراق به درب اتاق برسد، به علت اختلاف فشاری که بین گازهای لایه‌ی داغ و محیط اطراف وجود دارد، به سمت بیرون اتاق منحرف می‌شوند و از اتاق خارج می‌شود که این موضوع در شکل ۸ در زمان ۱۰ ثانیه مشاهده می‌شود. میزان هوای خروجی در تعامل با مقدار هوای تازه‌ی وارد شده است. هر چه مقدار نرخ آزادسازی حرارت بیشتر می‌شود، مقدار ارتفاع لایه‌ی گازهای داغ نزدیک سقف بیشتر می‌شود.

با گذشت زمان، ارتفاع لایه‌ی گازهای داغ بیشتر شده تا مرحله‌ای که دیگر ثابت می‌ماند. با ثابت‌شدن مقدار ارتفاع لایه‌ی گازهای داغ، آتش در اتاق به یک حالت شبه‌پایدار می‌رسد و تغییری در رفتار متوسط آتش دیده نمی‌شود. هرچه نرخ آزادسازی حرارت بیشتر می‌شود، زمان رسیدن به حالت شبه‌پایدار کمتر می‌شود؛ به‌عنوان‌مثال در حالت نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰ کیلووات، در زمان ۴۰ ثانیه به حالت شبه‌پایدار می‌رسد و در حالت ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات به ترتیب در زمان‌های ۳۰ و ۲۰ ثانیه به حالت شبه‌پایدار می‌رسد.

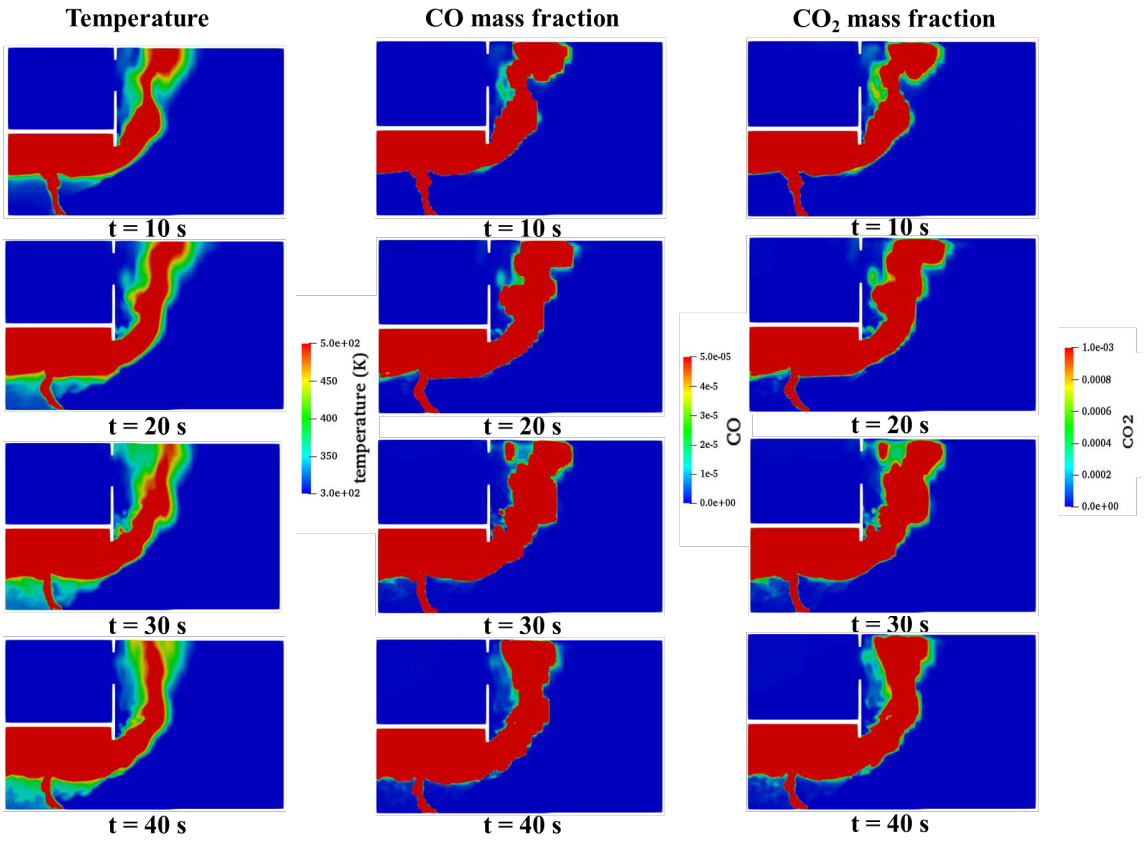
نکته‌ای که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ آزادسازی حرارت، میزان دمای کلی گازهای مستقر در لایه‌ی گازهای داغ بیشتر می‌شود. به‌طوری‌که در نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات، به ترتیب مقدار بیشینه‌ی دما به ۱۲۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۷۰۰ کلوین می‌رسد. دلیل این افزایش دما، در افزایش نرخ آزادسازی حرارت است. ازآنجاکه گازهای مستقر در لایه‌ی گازهای داغ جابجایی زیادی ندارند لذا با دریافت انرژی، افزایش دما می‌دهند؛ حال اگر میزان انرژی که به آن‌ها تزریق می‌شود بیشتر شود، مقدار افزایش دما هم زیادتر می‌شود.

نکته‌ای که در بحث آتش در ساختمان از اهمیت بالایی برخوردار است، گازهای خروجی از اتاق آتش هستند. اگر گازهای خروجی از اتاق دمای بالای داشته باشند، ممکن است با نفوذ به اتاق‌های بالایی



شکل ۸. کانتور دمای متوسط صفحه‌ی میانی (x=۰)

Fig. 8. Mean temperature contour in the middle plate (x = 0)



شکل ۹. روند افزایش دما و گازهای سمی در طبقه‌ی دوم برای نرخ حرارت ۵۰۰ کیلووات

Fig. 9. The trend of increasing temperature and toxic gases on the second floor for a heating release rate of 500 kW

خطراتی برای این اتاق‌ها و ساکنین آن‌ها داشته باشند. یا حتی اگر دمای گازهای خروجی بالا باشد، تشعشع این گازها بالاست و بنابراین ممکن است از طریق تشعشع خطراتی برای محیط اطراف وارد کنند.

با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود که گازهای خروجی از اتاق آتش در حالت نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰ کیلووات، زمانی که به طبقه‌ی دوم می‌رسند در حدود ۵۰۰-۶۰۰ کلوین است؛ اما زمانی که نرخ آزادسازی حرارت ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات هست به‌تدریج دمای گازهای مقابل طبقه‌ی دوم به محدوده‌ی ۷۰۰-۹۰۰ و ۱۱۰۰-۱۳۰۰ کلوین می‌رسد. به‌وضوح مشاهده می‌شود که افزایش نرخ آزادسازی حرارت می‌تواند طبقات بالایی را در معرض خطرات جدی قرار دهد.

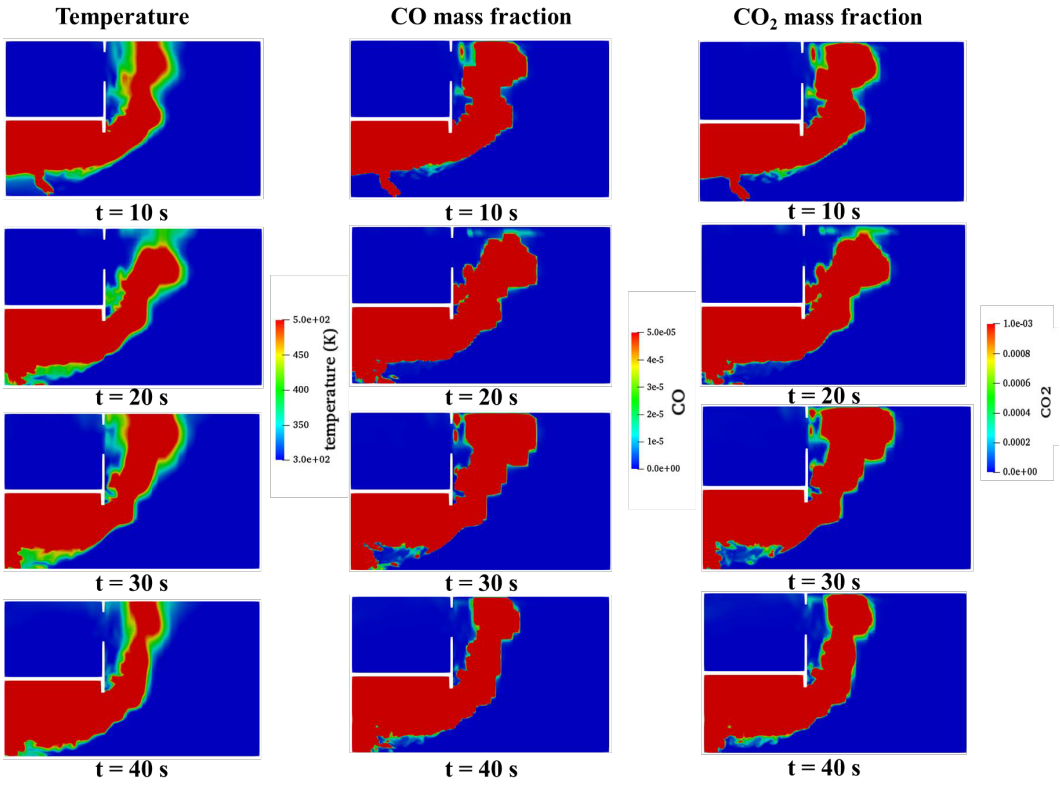
۳- ۴- ورود گازهای داغ و سمی در طبقه‌ی بالا

گازهای خروجی از اتاق آتش به سمت بالا حرکت کرده و در مسیر ممکن است به طبقه‌ی دوم وارد شده و خطراتی برای این طبقه ایجاد کنند. با توجه به شکل ۸، حالتی که نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰۰ کیلووات باشد، محدوده‌ی بیشتری از اتاق دمای بالاتر دارد؛ بنابراین در شکل ۹ روند افزایش دما و گازهای سمی در طبقه‌ی دوم برای نرخ حرارت ۵۰۰۰ کیلووات آورده شده است. قبل از بحث بر نتایج نیاز است درزمینه‌ی مقادیر بحرانی و خطرناک برای دما و گازهای سمی آتش صحبت شود.

طبق استاندارد اداره‌ی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای[1] مقدار بحرانی برای گونه‌ی سمی مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن به ترتیب ۲۵-۵۰ و ۵۰۰۰ پی.پی.ام[2] است [۲۵]. البته این مقادیر حد پایین برای این گونه‌ها است. برای دما نیز دمای ۳۸۸ کلوین به‌عنوان دمای بحرانی برای آسیب‌رسانی به بدن انسان گزارش شده است.

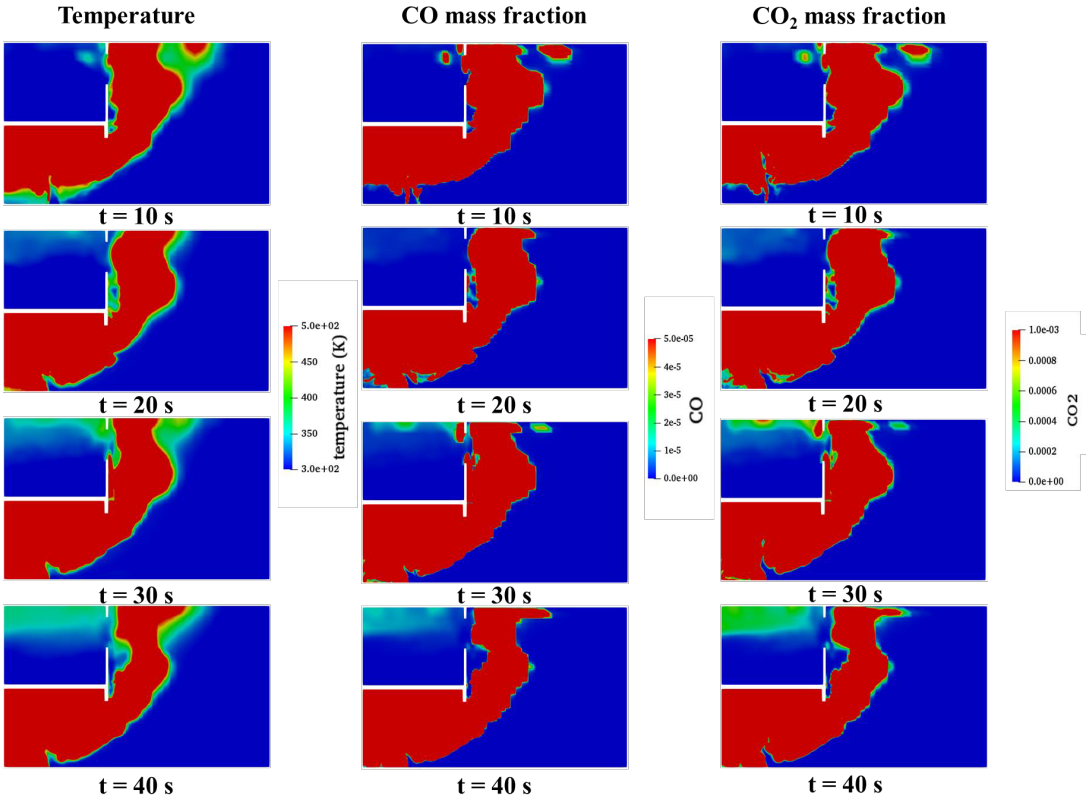
با توجه به محدوده‌ی بحرانی دما و گازهای سمی، در شکل ۹، ۱۰ و ۱۱ نتایج دما و گازهای سمی در این محدوده متمرکز شده و در زمان‌های مختلف برای نرخ آزادسازی حرارت مختلف ترسیم شده است. در شکل ۹ و ۱۰ که نتایج دما و گازهای سمی برای نرخ

1 Occupational Safety and Health Administration (OSHA)
2 Parts per million (ppm)



شکل ۱۰. روند افزایش دما و گازهای سمی در طبقه‌ی دوم برای نرخ حرارت ۱۰۰۰ کیلووات

Fig. 10. The trend of increasing temperature and toxic gases on the second floor for a heating release rate of 1000 kW



شکل ۱۱. روند افزایش دما و گازهای سمی در طبقه‌ی دوم برای نرخ حرارت ۵۰۰۰ کیلووات

Fig. 11. The trend of increasing temperature and toxic gases on the second floor for a heating release rate of 5000 kW

جدول ۴ . مقادیر دما و گونه‌های سمی در طبقه‌ی دوم
Table 4. Temperature values and toxic species in the second floor

نرخ آزادسازی حرارت	دما (کلوین)		مونواکسیدکربن (پی.پی.ام)		دی‌اکسیدکربن (پی.پی.ام)	
	بیشینه	متوسط	بیشینه	متوسط	بیشینه	متوسط
۵۰۰ کیلووات	۳۱۰	۳۰۴	۲/۳	کمتر از ۱	۸۹	۴
۱۰۰۰ کیلووات	۳۳۰	۳۱۰	۳/۸	کمتر از ۱	۱۵۰	۱۰
۵۰۰۰ کیلووات	۴۲۰	۳۳۰	۷۶	۳/۶۸	۱۸۰۰	۱۵۰

آزادسازی حرارت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلووات آورده شده است، با گذشت زمان دما و گونه‌های سمی در اتاق آتش به تدریج حجم زیادی از اتاق را اشغال می‌کند.

نکته‌ای که در شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، در نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ کیلووات، در طبقه‌ی دوم دما و گونه‌های سمی بسیار کمتر از مقدار بحرانیِ استاندارد اداره‌ی ایمنی و بهداشت حرفه‌ای است و بنابراین در حالتی که نرخ آزادسازی حرارت در محدوده‌ی حالت بحرانی و کمتر از آن باشد، طبقه‌ی دوم از مخاطرات آتش‌سوزی تا حد قابل قبولی در امان است.

با گذشت زمان، دما در طبقه‌ی دوم توسط گازهای خروجی از طبقه‌ی اول افزایش می‌یابد. در زمان ۱۰ ثانیه دما در نزدیکی سقف طبقه دوم به حدود ۳۳۰ کلوین می‌رسد و به‌تدریج دما افزایش می‌یابد تا در زمان ۴۰ ثانیه، در طبقه‌ی دوم دما به ۳۸۰-۳۹۰ کلوین می‌رسد و به محدوده‌ی بحرانی دما نزدیک می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که در شرایطی که نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰۰ کیلووات باشد، آتش در ساختمان می‌تواند برای طبقات بالا خطرناک باشد.

البته برای نرخ آزادسازی حرارت پایین‌تر، دمای طبقه‌ی دوم کمتر از حالت بحرانی است، اگرچه در شکل ۹ نشان داده نشده است. همچنین مشاهده می‌شود که با گذشت زمان فضای بیشتری از طبقه‌ی بالا به حالت بحرانی دما نزدیک می‌شود. همین موضوع نیز برای گونه‌های سمی مونواکسید کربن مشاهده می‌شود. در زمان ۴۰ ثانیه فضایی از طبقه‌ی دوم در ۲۵ پی.پی.ام رسیده‌اند. درواقع به محدوده‌ی بحرانی مونواکسید کربن نزدیک شده‌اند. ولی ازنظر دی‌اکسیدکربن در طبقه‌ی دوم، حالت بحرانی اتفاق نیفتاده است؛ بنابراین در این نرخ آزادسازی حرارت (که مقداری نرخ آزادسازی حرارت بیشینه است) ازنظر دی‌اکسیدکربن خطری برای طبقه‌ی بالایی ایجاد نمی‌شود. در جدول ۴ مقادیر بیشینه و متوسط دما و گونه‌های سمی در طبقه‌ی دوم برای نرخ آزادسازی حرارت مختلف آورده شده است. با توجه به جدول ۴ و مقادیر بحرانی دما و گونه‌های سمی، در نرخ آزادسازی حرارت کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات، برای طبقه‌ی دوم ازنظر دما و گونه‌های سمی مشکل جدی وجود ندارد. فقط برای حالتی که نرخ آزادسازی حرارت ۵۰۰۰ کیلووات و بیشتر باشد، طبقه‌ی دوم در معرض خطر قرار می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با هدف بررسی خطرات ناشی از آتش‌سوزی برای طبقات بالا، ساختمانی دو طبقه که طبقه‌ی اول، اتاق آتش و طبقه‌ی دوم از طریق پنجره در معرض آتش و گونه‌های خطرناک آن قرار می‌گیرد، بررسی شد. به‌منظور اعمال شرایط کلی بر شبیه‌سازی، میزان نرخ آزادسازی حرارت در اتاق آتش در حالت‌های مختلف با سه نرخ ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ کیلووات بررسی شد. میدان دما، گونه‌های خطرناک مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن در طبقه‌ی دوم مطالعه شدند. به‌منظور بررسی دقیق جزییات آتش‌سوزی از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل احتراقی اف.جی.ام استفاده شد. با صحت‌سنجی نتایج مشاهده شد که با استفاده از این دو روش، دقت شبیه‌سازی در حد قابل قبولی است؛ به‌طوری‌که مقدار خطای نسبی نتایج عددی دمای متوسط با نتایج تجربی در خط مرکزی درب اتاق، ۱۵ درصد و در داخل اتاق کمتر از ۱۲ درصد است و البته مقدار خطا در پیش‌بینی سرعت کمتر است.

با بررسی نتایج مشاهده شد، زمانی که نرخ آزادسازی حرارت کمتر از ۱۰۰۰ کیلووات باشد (زمانی که تهویه‌ی طبیعی در حالت بحرانی و کمینه باشد)، برای طبقه‌ی دوم ازنظر دما و گونه‌های سمی مشکل جدی وجود ندارد؛ اما در حالت بیشینه‌ی تهویه‌ی طبیعی، طبقه‌ی دوم در معرض خطر قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که ازنظر دما و

گاز مونواکسید کربن به حالت بحرانی می‌رسد اما ازنظر گاز دی‌اکسید کربن خطری جدی برای طبقه‌ی دوم وجود ندارد. به عنوان مثال، زمانی که نرخ آزادسازی حرارت کمتر از ۵۰۰۰ کیلووات باشد، در طبقه‌ی دوم دما به ۴۲۰ کلوین و گونه‌ی سمی مونواکسیدکربن به ۷۶ پی.پی.ام می‌رسد که این مقادیر بالاتر از حد مجاز برای آسیب‌نرسیدن به انسان، است. نکته‌ی مهم دیگر این است که گونه‌ی سمی دی‌اکسیدکربن در طبقه‌ی دوم، برای هیچ یک از نرخ آزادسازی حرارت، حالت بحرانی ایجاد نکرده است.

۵- مراجع

[1] L. Li, Z. Gao, J. Ji, J. Zhu, H. Wang, D. Zhou, Experimental study of fire growth and ejected plume in a cross-ventilation compartment under wind condition, Fire and Materials, 43 (2019) 344-357.

[2] A. Byström, X. Cheng, U. Wickström, M. Veljkovic, Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature, Building and Environment, 51 (2012) 255-262.

[3] R.K. Janardhan, S. Hostikka, Experiments and Numerical Simulations of Pressure Effects in Apartment Fires, Fire Technology, 53 (2017) 1353-1377.

[4] H. Prétrel, R. Sayada, K. Varrall, L. Audouin, O. Vauquelin, Experimental study based on large-scale smoke propagation fire tests through a horizontal opening connecting two mechanically ventilated compartments, Fire Safety Journal, 90 (2017) 28-43.

[5] H. Wan, Z. Gao, J. Ji, L. Wang, Y. Zhang, Experimental study on merging behaviors of two identical buoyant diffusion flames under an unconfined ceiling with varying heights, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3899-3907.

[6] L. Hu, X. Sun, X. Zhang, F. Ren, Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3859-3867.

[7] X. Sun, L. Hu, X. Zhang, F. Ren, Experimental study on evolution of compartment fire and facade flame through an opening with the fire source attached to a backwall at different elevations, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3919-3926.

[8] F. Ren, X. Zhang, L. Hu, X. Sun, An experimental study on the effect of fire growth in a lower-floor compartment on fire evolution and facade flame ejection from an upper-floor compartment, Proceedings of the Combustion Institute, 37 (2019) 3909-3917.

[9] F. Ren, L. Hu, X. Sun, K. Hu, An experimental study on vertical temperature profile of facade fire plume ejected from compartment with an opening subjected to external wind normal to facade, International Journal of Thermal Sciences, 130 (2018) 94-99.

[10] F. Ren, L. Hu, X. Sun, K. Hu, Experimental study on flame radiation fraction of facade fire ejected from opening of a compartment, Applied Thermal Engineering, 129 (2018) 573-576.

[11] Y. Tong, D. Huo, P. Zhu, X. Niu, Prediction of natural and hybrid ventilation performance used for fire-induced smoke control in a large single space, Fire Safety Journal, 100 (2018) 20-31.

[12] D.J. Pesic, D.N. Zigar, I. Anghel, S.M. Glisovic, Large Eddy Simulation of wind flow impact on fire-induced indoor and outdoor air pollution in an idealized street canyon, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 155 (2016) 89-99.

[13] 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.

[14] O. Tlili, H. Mhiri, P. Bournot, Empirical correlation derived by CFD simulation on heat source location and ventilation flow rate in a fire room, Energy and Buildings, 122 (2016) 80-88.

[15] O. Tlili, H. Mhiri, P. Bournot, Airflow induced by a room fire: Effect of roof shape and source location, International Journal of Thermal Sciences, 90 (2015) 135-149.

[16] O.M. Knio, H.N. Najm, P.S. Wyckoff, A semi-implicit numerical scheme for reacting flow: II. Stiff, operator-

split formulation, Journal of Computational Physics, 154(2) (1999) 428-467.

[17] 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.

[18] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Pool Fire Using One-Equation Sub-Grid Scale, Technology, (2011).

[19] C. Han, H. Wang, A comparison of different approaches to integrate flamelet tables with presumed-shape PDF in flamelet models for turbulent flames, Combustion Theory and Modelling, 21 (2017) 603-629.

[20] 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.

[21] 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.

[22] G. Heidarinejad, H. PasdarShahri, m. safarzadeh, The Importance of Using the Combustion and Sub-grid Model in Modelling of Large Pool Fire Flow Field, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2019) .(in Persian)

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

[24] J. White, S. Vilfayeau, A. Marshall, A. Trouve, R.J. McDermott, Modeling flame extinction and reignition in large eddy simulations with fast chemistry, Fire safety journal, 90 (2017) 72-85.

[25] NJHealth, (january). Available: https://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-know/.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Safarzadeh, Gh. Heidarinejad, H. Pasdarshahri .Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3335-3350.

DOI: 10.22060/mej.2020.18086.6729