

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(11) (2024) 271-274 DOI: 10.22060/mej.2024.22506.7634



Numerical study of the spread of toxic and hot fire gases in a multi-story residential complex with and without sprinkler fire extinguishing system

Hamid Tajaddod, Ghassem heidarinejad *, Mohammad Safarzadeh

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

ABSTRACT: In this study, the effect of a water-based fire suppression system on fire control and

extinguishment in a multi-story building was investigated using FDS software. The geometry consisted

of a five-story building with a total of 25 units, where the fire room with heptane fuel was located on

the third floor in the center of the ground floor room. Temperature parameters and species such as

carbon monoxide and carbon dioxide were measured in each room, and the results were analyzed for two conditions with and without sprinklers from the start of combustion to 100 seconds. Validation showed that the numerical results of this study had an 8% relative error compared to experimental results.

Additionally, in the condition without sprinklers, the temperature in the third-floor fire room reached 700

degrees Celsius within 30 seconds, but with sprinklers, extinguishment occurred in less than 20 seconds.

This behavior also occurs for toxic species such as carbon monoxide and carbon dioxide, which are at

risk on all floors above the fire room without sprinklers. Therefore, by considering minimum, maximum,

and average values, the importance of sprinklers in extinguishing fires in the room and controlling toxic

Review History:

Received: Jun. 24, 2023 Revised: Oct. 18, 2023 Accepted: Jan. 08, 2024 Available Online: Jan. 19, 2024

Keywords:

Building Fire FDS Software Sprinkler Fire Extinguishing Toxic and Hot Gases Fire Control

1-Introduction

In the contemporary world, events such as fires are generally recognized as high-risk events with significant consequences. The construction of large buildings and various complexes has created a new challenge for fire safety, with building fires accounting for a significant portion of these types of events. Among building fires, situations where the number of floors exceeds one floor pose concerns such as providing escape routes and preventing the spread of toxic gases to upper floors. These challenges make fires on upper floors a scenario that requires more study than ever before.

and hot gases in other rooms can be concluded.

To this end, studies have been conducted on the spreading and control of fires in various buildings and compartments. For example, Safarzadeh et al. [1] investigated the numerical growth and spread of fire in a one-story and a three-story building. The results showed that when the fire spreads outside the room, it can also expose upper floors to toxic and hot gases, such that the temperature in the third floor reaches 1000 Kelvin and toxic gases such as carbon dioxide and carbon monoxide also reach critical conditions. Safarzadeh et al. [2] observed in another study that even with an increase in the number of floors from 3 to 5, this risk persists and upper floors of the room on fire are exposed to toxic and hot gases.

Based on the review and analysis of previous studies, one of the gaps in these studies is the lack of investigation into the effect of the fire sprinkler system on controlling and extinguishing fires in multi-story buildings to prevent the spread of toxic and hot gases to upper floors. Therefore, in this study, first, the growth and spread of fire in the interior space of the building with a fuel source placed at the center of the room on the ground floor are investigated. In the second step, the effect of the fire sprinkler system on controlling the fire and preventing the spread of toxic gases and smoke to upper floors and adjacent areas is studied and compared.

2- Methodology

Fire behavior in an environment is a physical phenomenon and of the turbulent flow type. In the continuous phase, mass, momentum, energy, and species conservation equations need to be solved alongside the equation of state. The sprinkler spray is modeled using the Lagrangian approach. In these models, Lagrangian particles are injected into the computational domain. Particle motion and interaction between the continuous and discrete phases are determined by solving Lagrangian equations of motion.

In this study, version 6.7.6 of the open-source fire dynamics simulator software was used to simulate the fire. This software solves the Navier-Stokes equations numerically for low-speed flows and thermal flows with an emphasis on heat and smoke transfer caused by combustion. The partial

^{*}Corresponding author's email: gheidari@modares.ac.ir





Fig. 1. Geometry of CFD domain



differential equations were solved using the second-order, time-accurate, and spatially-discretized finite difference method explicitly.

3- Result and Discussion

The study focuses on a commercial-residential building with 25 rooms, where the ground floor rooms are commercial and floors 1 to 4 are residential. The room geometry is based on the study by Li [3], which considers a single-compartment geometry and experimentally and numerically investigates the effect of a water mist fire suppression system with a nozzle on the interaction of heptane pool fire. Fuel source and other measurement parameters, including temperature sensors, species, and sprinkler fire suppression system, are located on the ground floor and in unit 3. The sprinklers will be activated after 10 seconds. The complete specifications of the room, along with equipment installation details, are shown in Figure 1.

In Figure 2, the results of hot gas dispersion in the building floors without and with sprinkler systems are shown. The results are displayed for four time intervals: initial, 30

Fig. 2. Temperature contour

seconds, 60 seconds, and 100 seconds. The temperature range is from 0 to 1500 degrees Celsius, but for better visualization, the range from 0 to 200 degrees Celsius is selected. In the initial state, the hot gases produced by combustion, which have a lower density than fresh air, move towards the ceiling of the room. According to the temperature contour in Figure 2, at 30 seconds, the temperature in the third room on the first floor reaches 200 degrees Celsius. At 60 seconds, more heat penetration is observed on other floors compared to previous times; thus, the temperature is about 120 degrees Celsius on the second floor and less on the third and fourth floors. This result shows that the farther the floors are from the fire room, the lower the temperature they have and the less risk they pose. As observed in the figure, the flames have also reached up to the third floor and have an advance of one meter in horizontal dimension from the front door.

In the second part of this study, to investigate and analyze the use of sprinkler fire suppression system and its extinguishing process, Figure 2 shows its results. The sprinkler fire suppression system is activated after 10 seconds. The behavior and the process of fire development are similar to the previous state, but it differ from 10 seconds onwards. Until 10 seconds after the activation of the sprinkler system, the fire is still active, which is why in Figure 2, it can be seen that although the temperature has decreased by 30 seconds and the peak heat of the fire has been controlled, a temperature of 100 degrees Celsius is still obtained at this time (although it should be noted that the temperature of the fire room is still close to 100 degrees Celsius at 30 seconds, the fire has been extinguished before this time).

4- Conclusions

The lack of investigation into the effectiveness of waterbased fire suppression systems in controlling and extinguishing fires in multi-story buildings to prevent the spread of toxic and hot gases to upper floors is one of the gaps in previous studies that have been examined in this study. Based on the observed temperature and toxic species in the case without sprinklers, at 100 seconds, the temperature conditions in the third-floor room reached 700 degrees Celsius, while lower temperatures were recorded on the third and fourth floors. This result indicates that the further away the floors are from the fire room, the lower the temperature and the less risk involved. Additionally, at 100 seconds, the amount of carbon monoxide in the first and second floors was reported to be 220 and 175 ppm, respectively, while it was less than 100 ppm in the third and fourth floors. In the case with sprinklers, the fire was extinguished before 20 seconds had passed, but toxic and hot gases remained in the rooms, gradually escaping from the rooms after the fire was extinguished.

References

- 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 (2021) 106612.
- [2] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, The effect of vertical and horizontal air curtain on smoke and heat control in the multi-storey building, Journal of Building Engineering, 40 (2021) 102347.
- [3] J. Lee, Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening, Nuclear Engineering and Technology, 51(2) (2019) 410-423.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Tajaddod, Gh. heidarinejad, M. Safarzadeh, Numerical study of the spread of toxic and hot fire gases in a multi-story residential complex with and without sprinkler fire extinguishing system, Amirkabir J. Mech Eng., 55(11) (2024) 271-274.



273

This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۲۷۷ تا ۱۲۹۸ DOI: 10.22060/mej.2024.22506.7634

مطالعه عددی گسترش گازهای سمی و داغ حریق در مجتمع مسکونی چندطبقه با و بدون سیستم اطفای حریق اسپرینکلر

حميد تجدد، قاسم حيدرىنژاد *، محمد صفرزاده

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

خلاصه: در این مطالعه عددی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه با استفاده نرمافزار اف دی اس انجام شد. هندسه شامل یک ساختمان پنج طبقه با مجموع ۲۵ واحد که اتاق آتش با سوخت هپتان، در واحد سوم در مرکز اتاق طبقه همکف قرار دارد. در هر اتاق پارامترهای دما و گونههایی نظیر مونوکسید کربن و دی اکسید کربن اندازه گیری و نتایج از شروع احتراق تا ۱۰۰ ثانیه برای دو حالت با و بدون اسپرینکلر بررسی شد. با صحتسنجی مشخص شد که نتایج عددی این مطالعه با نتایج تجربی ۸ درصد خطای نسبی دارد. همچنین، در حالت بدون اسپرینکلر طی زمان ۳۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد رسید؛ اما در حالت با اسپرینکلر، خاموشی در اتاق آتش کمتر از ۲۰ ثانیه اتفاق افتاد. چنین رفتاری نیز برای گونههای سمی مونوکسید کربن و دی اکسید کربن اتفاق می افتد؛ به نحوی که در حالت بدون اسپرینکلر در تمامی طبقات بالای اتاق آتش در مخاطره قرار می گیرند. از این رو دی اکسید کربن اتفاق می افتد؛ به نحوی که در حالت بدون اسپرینکلر در تمامی طبقات بالای اتاق آتش در مخاطره قرار می گیرند. از این رو دی که جمع بندی، با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما و سایر گونهها، می توان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاق ها یی برد.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۷/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی: حریق در ساختمان نرمافزار افدیاس اطفای حریق اسپرینکلر گازهای سمی و داغ کنترل آتش

۱ – مقدمه

در جهان کنونی، وقایعی همچون آتش سوزی به طور کلی به عنوان یک رویدادی با مخاطرات و پیامدهای بالا شناخته می شوند. با احداث ساختمانهای بزرگ و مجتمعهای مختلف چالش جدیدی را برای ایمنی آتش سوزی ایجاد کرده است و تقاضای جدیدی را برای ارتقای سیستمهای اطفای حریق و سایر پارامترهای جلوگیری از رشد و گسترش حریق را عمال کرده است. یکی از حوزههای مهمی که در حال حاضر اغلب در بحث چالش های بزرگ اجتماعی کشورها وجود ندارد، تأثیر آتش سوزی بر سلامت، چالش های بزرگ اجتماعی کشورها وجود ندارد، تأثیر آتش سوزی می تواند نیمنی، آب وهوا، تاب آوری جامعه و اقتصاد است [۱]. آتش سوزی می تواند خسارات قابل توجهی به ساختمان ها وارد کند. خسارات اقتصادی ناشی از آتش سوزی در کشورهای توسعه یافته به یک درصد از تولید ناخالص داخلی می رسد [۲]. آتش سوزی ها به عنوان یکی از مهم ترین بلایای طبیعی شناخته می شوند که سالانه باعث مرگ حدود ۲۰۰۰۰۰ نفر در سراسر جهان می شود [۳] که از بین انواع آن، آتش سوزی در ساختمان سهم زیادی دارد. در بین

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

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) 🕥 🕥 است این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

آتش سوزی در ساختمان، حالتی که تعداد طبقات از یک طبقه بیشتر می شود، تعبیه راههای فرار و جلوگیری از نشر گازهای سمی به طبقات بالا و از این موارد، دغدغههایی است که آتش سوزی در طبقات بالا را با چالش هایی روبرو می کند که مطالعه ی این سناریو را بیش از پیش نمایان می سازد.

یکی از آسیب پذیرترین و پیچیده ترین سناریوهای مراحل آتش سوزی در ساختمان از لحاظ ایمنی آن، مرحله کاملاً توسعه یافته است [۴]. به همین منظور مطالعاتی در زمینه گسترش و کنترل حریق در ساختمان ها و محفظه های مختلف صورت گرفت؛ به طور مثال صفرزاده و همکاران [۵] به بررسی عددی رشد و گسترش آتش در ساختمان یک و سه طبقه پرداختند. با توجه به نتایج مشخص شد زمانی که حریق به خارج از اتاق منتشر می شود، می تواند طبقات بالایی را نیز در معرض گازهای سمی و داغ قرار دهد به نحوی که که دما در طبقه سوم به ۱۰۰۰ کلوین می رسد و گونه سمی دی اکسید کربن و مونواکسید کربن نیز به شرایط بحرانی برسد. صفرزاده و همکاران [۶] در تحقیقی دیگر مشاهده کردند که حتی با افزایش

اتاق آتش، در معرض گازهای سمی و داغ قرار دارند.

بسیک و همکاران [۷] به بررسی نشر و گسترش گازهای داغ حاصل از احتراق و دود در یک ساختمان چندطبقه که در مقابل و مجاور آن نیز ساختمان چندطبقه دیگر قرار دارد پرداختند. با استفاده از نرمافزار اف دی اس^۱، گسترش حریق و محصولات حاصل از آن را به ساختمانهای دیگر در شرایطی که یکی از اتاقهای این ساختمان آتش بگیرد، بررسی کردند. نتایج نشان می دهد؛ دمای پلوم آتش و غلظت آلایندههای گازی به مقدار هوای محیط در محفظه آتش بستگی دارد. مقادیر بیشتر اکسیژن در محفظه باعث غلظت کمتر مونوکسیدکربن و غلظت دی اکسید کربن بیشتر می شود. نتایج عددی نشان می دهد که برهمکنش قوی بین جریان باد و جریان پلوم آتش وجود دارد که با افزایش سرعت باد هوا ممکن است، گازهای سمی و داغ به

هوستیکا و جاناردان [۸] مجموعهای از آزمایشهای آتش سوزی را در یک ساختمان آپارتمانی در طبقه اول با مساحت ۵۸/۶ مترمربع تحت شرایط تهویه مختلف برای تأثیر افزایش فشار در محفظهها و اثرات آن بر جریان تهویه انجام دادند. منبع سوخت از دو نوع آتش استخری هپتان و فوم پلی یورتان بوده و در پذیرایی واحد قرار داشته است. نتایج تجربی نشان میدهد که فشار هوای ناشی از احتراق در آپارتمان نسبتاً بسته میتواند به اندازهای بالا باشد که جریانهای سیستم تهویه را بازگرداند. حداکثر دمای گاز در زیر سقف اتاق حدود ۳۰۰ درجه سانتیگراد بود. بر اساس نتایج تجربی و شبیهسازی با استفاده از نرمافزار اف دی اس، میتوان نتیجه گرفت که تأثیر پیکربندی تهویه (نشت مؤثر) برافزایش فشار در محفظه قابل توجه است و باید در طول فرآیند طراحی ایمنی آتش سوزی در نظر گرفته شود. فشار بیش از حد ناشی از آتش سوزی باید به عنوان یک خطر بالقوه برای تخلیه شناخته شود زیرا میتواند از فرار ساکنان از فضاهایی با درهای بازشو به سمت داخل جلوگیری کند.

البته علاوه بر نقش تعداد طبقات، پارامترهای دیگری همچون اندازه محفظه، تهویه، نوع و مقدار سوخت درگیر عواملی هستند که تکامل آتش را در این شرایط تعیین کرده و بر نشر گازهای سمی اثر میگذارند [۹]. با مشخص شدن آتشسوزی و دغدغههای مرتبط با آن، سازوکار کنترل و خاموشی آتش مهمتر از خود آتش میشود که تحقیقات مختلف از روشهای مختلف به این موضوع پرداختهاند. یکی از این روشها، استفاده از سیستم

1 Fire dynamics simulator software

اطفاء حریق آبی نظیر سیستم اسپرینکلر^۲ یا سیستم مه آب^۳ [۱۰] است. قطرات آب با به کارگیری مکانیزم های کاهش دمای فاز پیوسته^۴، کاهش دمای سطح سوخت^۵، جذب انرژی تشعشی² و کاهش سطح اکسیژن^۷ در محیط باعث خاموشی و مهار آتش میشوند [۱۱]. این فناوریها اکنون کاربردهای گستردهای در پیشگیری و مقابله با آتش سوزی ساختمانها [۱۲] آتش سوزی تونل [۱۳]، آتش سوزی کشتی [۱۴و۱۵]، آتش سوزی انبارها [۱۶] آتش سوزی محفظهای^۸ [۱۷] و آتش سوزی آتش محافظت شده^۴ [۱۸] دارد. مزایای استفاده از اسپرینکلرهای آتش نشانی نسبت به سایر تکنیکهای اطفای حریق توسط بسیاری از محققین [۱۹]–[۱۲] به تفصیل موردبحث قرارگرفته است؛ اما تلاش فنی و تحقیقات علمی بیشتری در این زمینه لازم است تا از آن برای حفاظت ساختمانها در برابر آتش سوزیها استفاده

حفاظت در برابر آتش، با عنوانهایی مانند سیستم اسپرینکلر و «خاموشی حریق»^{۱۰} یا سیستم اسپرینکلر و «کنترل و خاموشی حریق»^{۱۱} نیز شناخته میشود. بهمنظور ارزیابی و تجزیهوتحلیل میزان پرداختن به این موضوع عبدالرحمان و همکاران [۲۱] باهدف بررسی تعداد این دو کلیدواژه، در متون تحقیقاتی و نشریات پژوهشی در پایگاههای اطلاعاتی جستجو کرده و شکل ۱ را آماده کردند. با توجه به شکل ۱، تعداد مقالات موجود در مورد این دو کلیدواژه در ۵۰ سال گذشته (دوره ۱۹۷۰–۲۰۲۰) نشان دادهشده است. مقاله در عنوان از سیستم اسپرینکلر و «کنترل و خاموشی حریق» و ۹۴۲ مقاله در عنوان از سیستم اسپرینکلر و «کنترل و خاموشی حریق» و ۹۴۲ مقاله از اسپرینکلر و «کنترل و خاموشی حریق» استفاده کردهاند. با مشاهده مقاله از اسپرینکلر و «کنترل و خاموشی حریق» استفاده کردهاند. با مشاهده دوند انتشارات به تفکیک سال در شکل ۱، میتوان مشاهده کرد که موضوع حفاظت در برابر آتش، موردتوجه کافی و مستمر از سوی محققان قرارگرفته است که نشان میدهد چالشهای علمی در این زمینه همچنان پابرجا و درحال توسعه است [۲۲].

در زمینه کنترل حریق و اطفای آن با استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در فضاهای گوناگون مطالعاتی صورتگرفته است. به طور مثال

- 3 Watermist System
- 4 Gas Phase Cooling
- 5 Direct cooling
- 6 Blocking Radiant heat
- 7 Oxygen Displacement
- 8 Compartment Fire 9 Shield Fire
- 9 Shield Fire
- 10 Fire Extinguishing
- 11 Fire Suppression

² Sprinkler System



شکل ۱. پیشرفت مقالات موجود بر اساس کلمات کلیدی برای دوره ۱۹۷۰–۲۰۲۰. [۲۱] Fig. 1. Articles available by keyword for the period 1970-2020. [21]

لیو و همکاران [۲۲] در مطالعهای دو سیستم اطفای حریق رایج را (سیستم مه آب و سیستم اسپرینکلر) با مکانیسمهای اطفای حریق متمایز و بهصورت عددی در یک محفظه آتش کاملاً تهویه شده بررسی کردند. آتش استخری متان در مرکز محفظه بوده و ترموکوپلها و حس گرهای اندازه گیری نیز مستقیماً روی آتش قرار داشتند. در سیستم اسپرینکلر، کاهش حرارت مستقیم از منطقه آتش نقش عمدهای برای اطفای حریق دارد، درحالی که اثر تبخیر سهم قابل توجهی در اثر اطفای حریق کلی ندارد. با توجه به زمان اطفای حریق، مطالعه حاضر نشان داد که تحت شرایط عملیاتی یکسان، سیستم با اندازه قطرات کوچکتر تمایل به عملکرد بهتری دارد.

نانساوت و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در انبار حاوی مواد کلاس A حریق با استفاده از نرمافزار اف دی اس در شرایطی که اَتش محافظت شده باشد، پرداختند. مواد قابل اشتعال بر روی پالت چوبی و در قفسه قرار داشتند. اثرات دما بر سقف و گسترش حریق بررسی شد و مشخص شد مجموعه اسپرینکلری که در سقف قرار داشت، قادر به اطفای حریق نبوده ولی از گسترش حریق جلوگیری کرده است.

وانگ و همکاران [۲۳] به بررسی آزمونهای اطفای حریق در محیط ذخیرهسازی پرداختند. در این آزمایش منبع سوخت در بین یکی از طبقات

قرار داشته است که این قفسه ها دارای سه طبقه و شش ردیف بوده و دارای محصولات مقوایی است. دو سری اسپرینکلر شامل واکنش سریع و واکنش استاندارد^۲ در سقف قرار داده شده است. صحت سنجی نتایج عددی با استفاده از روش های دینامیک سیالات محاسباتی^۳ و نرمافزار فایرفوم^۴ انجام شد. نتایج نشان داد؛ اسپرینکلرهای واکنش سریع، آتش را به سرعت خاموش می کند در حالی که با اسپرینکلرهای واکنش استاندارد، علاوه بر آزمایش ها در شبیه سازی نیز، آتش را به پالت ها گسترش داده بود.

بهطور کلی بررسی حریق در محفظه یا اتاق، یکی از مهم ترین سناریوهای آتش سوزی در ساختمان است که نسبت به فضای محیطی باز پیچیدگیهای بیشتری دارد؛ چراکه حریق در فضای داخلی ساختمان، محبوس شده و نرخ آزادسازی حرارت سوخت، با توجه به تهویه فضا و نرخ انتقال حرارت محیط تغییر میکند [۲۴]. با روند رشد و گسترش حریق و پدیدههای مختلفی نظیر فلش آور^ه و بک درفت² در اتاق، حجم محصولات احتراق، گازهای سمی و

- 1 Early Suppression Fast Response (ESFR)
- 2 Standard Response Sprinkler Heads
- 3 Computational Fluid Dynamics (CFD)
- 4 fireFoam software
- 5 Flash over phenomenon
- 6 Backdraft phenomenon

دود افزایش پیداکرده و به سمت طبقات بالاتر و اتاقهای مجاور حرکت و سرایت می کند.

با توجه بهمرور و بررسی مطالعات پیشین، یکی از خلاًهای این مطالعات، عدم بررسی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه بهمنظور عدم نشر گازهای سمی و داغ به طبقات بالاست. با توجه به این موضوع، در این پژوهش ابتدا رشد و گسترش آتش در ساختمان در فضای داخلی ساختمان با قراردادن منبع سوخت در مرکز اتاق در طبقه همکف، بررسی شده و در گام دوم تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در کنترل حریق و جلوگیری از نشر گازهای سمی و دود در طبقات بالاتر و مجاور بررسی و مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

رفتار حریق در محیط یک پدیده فیزیکی و از نوع جریان اغتشاشی است. یکی از روشهای رایج که برای مطالعه فیزیک اغتشاش در جریان حریق استفاده می گردد، متوسط گیری مکانی با استفاده از فیلتر و روش گردابههای بزرگ^۱ است. تشخیص گردابههای بزرگ و کوچک نیازمند وجود یک فیلتر است. در روش گردابههای بزرگ، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه ترم تنش ناشی از اغتشاش بسیار گسترده و پیچیده بوده است. برای مدلسازی شبیهسازی گردابههای بزرگ، روش شناخته شده اسماگورینسکی وجود دارد که از آن استفاده شده است. همچنین معادله انتقال حرارت تابشی و معادله تابع دیواره در محاسبات لحاظ گردیده است.

برای محاسبه خواص جریانهای چند فازی مانند افشانهها [۲۵] یا جریانهایی که از ذرات بی شماری تشکیل شدهاند، از دیدگاه اویلری-لاگرانژی استفاده می شود. این رویکرد برای نشان دادن یک خانواده از تکنیکهای مدل سازی و شبیه سازی استفاده می شود که در آن قطرات یا ذرات در چارچوب مرجع لاگرانژی و میدان جریان فاز پیوسته در چارچوب مرجع اویلری نشان داده می شود [۲۶].

۲- ۱- معادلات فاز پيوسته (اولري)

در فاز پیوسته نیاز است که معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه در کنار معادله حالت حل شوند. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش شبیهسازی گردابههای بزرگ استفاده شده است نیاز است که معادلات ابتدا فیلتر گیری مکانی شده و بعد از آن با اعمال مدل زیر شبکه گسستهسازی شده و حل شوند. در مختصات کارتزین، معادلات متوسطگیری [۲۷] به فرم

1 Large Eddy Simulation (LES)

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \nabla . (\overline{\rho} \widetilde{u}) = \dot{m}_b^{\prime\prime\prime} \tag{(1)}$$

بقاي مومنتوم

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{u}) = -\nabla \bar{P} + \nabla \cdot \left[\mu_{eff} \left(\nabla \tilde{u} + (\nabla \tilde{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \tilde{u})I\right)\right] + \bar{\rho}g + f_b$$
(Y)

بقاي انرژي

$$\frac{\partial \left(\bar{\rho}\tilde{h}_{s}\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{h}_{s}\right) = \frac{\overline{D_{p}}}{Dt} + \nabla \cdot \left[\bar{\rho}\left(D_{th} + \frac{v_{sgs}}{Pr_{t}}\right)\nabla \tilde{h}_{s}\right] - \nabla \cdot \overline{q}_{r}^{"} + \overline{q}_{c}^{"} + \overline{q}_{b}^{"'}$$

$$(\Upsilon)$$

انتقال گونهها

$$\frac{\partial(\overline{\rho}Y_{k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho}\widetilde{u}\tilde{Y}_{k}) = \nabla \cdot \left[\overline{\rho}\left(D_{k} + \frac{\upsilon_{sgs}}{\mathrm{Sc}_{t}}\right)\nabla \tilde{Y}_{k}\right] + (\mathfrak{F})$$

$$\dot{m}_{b,k}^{m} + \overline{\omega}_{k}^{m} , \quad (k = 1, ..., N_{s} - 1)$$

معادله حالت

$$p_0 = \rho R_u T \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{W_{\alpha}} \tag{a}$$

در معادله بقای جرم $\overline{
ho}$ چگالی، \widetilde{u} سرعت، $\dot{m}_{b}^{\prime\prime\prime\prime}$ در معادله بقای

بقای جرم

$$\frac{dm_l}{dt} = -Ah_m\rho(Y_l - Y_g) \tag{Y}$$

بقاى مومنتوم

$$\frac{d}{dt}(m_d u_d) = -\frac{1}{2}\rho C_D \pi r_d^2 (u_d - u) |u_d - u| + m_d g \quad (\lambda)$$

بقای انرژی

$$m_c c_l \frac{dT_l}{dt} = Ah(T_g - T_l) + \frac{dm_l}{dt}h_v + \dot{q}_r \tag{9}$$

غلظت بخار اشباع

$$X_{d} = \exp\left[\frac{h_{v}M_{w}}{R}\left(\frac{1}{T_{b}} - \frac{1}{T_{d}}\right)\right] ,$$

$$Y_{d} = \frac{X_{d}}{X_{d}(1 - M_{a}/M_{w}) + M_{a}/M_{w}}$$

$$() \cdot)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi r_d \mathrm{Sh}\rho D(Y_d - Y_g) \quad , \tag{11}$$
$$\mathrm{Sh} = 2 + 0.6 \, \mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} \, \mathrm{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

 Y_{l} (۷) جرم، ρ چگالی فاز گازی، h_{m} (۲) در رابطه (۲) Y_{g} خریب انتقال جرم، φ چگالی فاز گازی، y_{g} در می بخار در فاز پیوسته کسرجرمی, بخار در فاز پیوسته (ملح قطره آب، C_{D} ضریب درگ، (سطح قطره) است. در رابطه (۸) m_{d} (۸) می سرعت قطرات آب، u سرعت فاز گاز است. در رابطه (۹) T_{g} دمای محیط، T_{l} دمای یکنواخت قطرات فرضی، A مساحت سطح قطره، T_{l}

مومنتوم
$$\mu_{eff}$$
 ویسکوزیته موثر (ترکیب ویسکوزیته اغتشاشی و آرام)،
 g شتاب گرانشی، f_{a} مجموعه نیروهای وارد ذره از فاز گسسته به فاز
پیوسته است. در معادله بقای انرژی \tilde{h}_s انرژی محسوس، d_{in} ضریب انتشار
حرارتی، Pr_t عدد پرانتل جریان مغشوش، $\bar{q}_r^{"}$ شار حرارت تابشی، $\bar{q}_c^{"}$
نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق، $\bar{q}_b^{"}$ گرمای ناشی از تبخیر
ذرات بوده، در معادله بقای گونه $_s \tilde{Y}$ کسر جرمی گونه، $_s D$ ضریب انتشار
خرات بوده، در معادله بقای گونه $\tilde{g}_{k,k}^{"}$ نرخ تغییر جرم ذرات و $\bar{w}_{k,k}^{"}$
نرخ سرعت واکنش گونه هستند [۲۷]. در نرمافزار اف دی اس انتقال حرارت
تابشی به صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می شود [۲۸].
معادله انتقال تابشی برای فضایی که دارای پارامترهای تشعشع (جذب، نشر
و انعکاس) است، به صورت رابطه (۶) است [۲۹].

$$S.\nabla I_{\lambda}(x,s) = -[\kappa(x,\lambda) + \sigma_{s}(x,\lambda)]I_{\lambda}(x,s) + B(x,s) + \frac{\sigma_{s}(x,\lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s,s^{*})I_{\lambda}(x,s^{*})ds^{*}$$

$$(F)$$

در رابطه ($\sigma_s(x, \lambda)$ ($\sigma_s(x, \lambda)$ موضعی جذب، ($\sigma_s(x, \lambda)$ فریب موضعی انعکاس، (κ, s) چشمه نشر انرژی تشعشعی، ($I_\lambda(x, s)$ موضعی انعکاس، (κ, s) چشمه نشر انرژی تشعشعی، (κ, s) شدت تابش' در طول موج λ است. ترم انتگرال در سمت راست رابطه (γ)، بیانگر انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر است [۲۹].

۲- ۲- معادلات فاز گسسته (لاگرانژی)

در این پژوهش، حالت اسپری اسپرینکلر با دیدگاه لاگرانژی نشان داده میشود. در این دیدگاه فاز پیوسته (شامل محصولات احتراق، ستون آتش، شعله و واکنشدهندهها) بهعنوان یک میدان اویلری در حال تکامل نشان داده میشود، درحالی که فاز گسسته (قطرات آب) با استفاده از ذرات لاگرانژی مدل سازی میشود. در این مدل ها، ذرات لاگرانژی به دامنه محاسباتی تزریق میشوند. حرکت ذرات با حل معادلات لاگرانژی حرکت و برهمکنش بین فاز پیوسته و گسسته تعیین میشود [۳۰]. تکامل قطره توسط ردیابی ذرات لاگرانژی بهخوبی توسعهیافته است و در مطالعاتی [۳۲و۳۱] از ذرات لاگرانژی برای شبیه ازی اسپری های اسپرینکلر آتش استفاده کردهاند. معادلات حاکم بر فاز گسسته (لاگرانژی) بر اساس روابط (۲) الی (۱۱) است [۳۲].

1 Radiation intensity

 h_v جرم قطره، h ضریب انتقال حرارت، c_1 گرمای ویژه مایع است و h_v گرمای نهان تبخیر و \dot{q}_r سرعت تابشی قطره است. در یک دمای معین، مقدار مول بخار، در ذرات آب به عنوان غلظت بخار اشباع در آن دما به صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می شود و نرخ تبخیر قطره آب از معادله (۱۱) پیروی می کند [۳۳].

۳- روش عددی

در این مطالعه برای شبیهسازی حریق از نرمافزار شبیهساز دینامیک آتش نسخه ۶.۷۶ استفاده شده است. این نرمافزار توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری توسعهیافته است و اغلب برای شبیهسازی آتش سوزی ساختمان استفاده می شود. این نرمافزار به صورت کد متن باز ^۲ بوده و به صورت عددی شکلی از معادله ناویر – استوکس را برای جریان با ماخ پایین و جریان حرارتی را با تأکید بر انتقال گرما و دود ناشی از آتش سوزی حل می کند [۳۴]. این نرمافزار برای مدل سازی جریان آشفته، روش شبیه سازی گردابه های بزرگ برای تحلیل جریان آشفته ناشی از آتش سوزی اعمال می کند. احتراق سوخت برای تحلیل جریان آشفته ناشی از آتش سوزی اعمال می کند. احتراق سوخت اطراف استفاده از مدل احتراق اتلاف گردابه ای محاسبه می شود و از روش اویلر – اطراف استفاده می کند [۳۵]. برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی از روش تفاضل محدود^۲ با دقت زمانی و مکانی مرتبه دوم گسسته شده و به صورت مریح^۳ حل شده است.

برای ایجاد رابط بصری بهتر و سهولت انجام شبیه سازی از رابط گرافیکی به نام پایروسیم^۴ نیز استفاده شده است که این برنامه نیز توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا توسعه یافته است [۳۶]. میدان حل در این کد با استفاده از مش های مکعبی سازمان یافته انجام شد. به منظور رفع وابستگی معادلات انتقال حاکم بر جریان سیال از الگوریتم سیمپل محاسبه می کند [۳۷]. برای انجام مطالعات از یک دستگاه کامپیوتر با پرداز شگر اینتل – ۴۹۷۰ کا با فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز که ۴ هسته حقیقی ۴ هسته مجازی و ۲۰ گیگابایت حافظه موقت دارد، استفاده شده است.

۴- صحت سنجی

گام اول در مطالعه عددی، بررسی شبکه و صحتسنجی است. به این

منظور با انتخاب هندسه نزدیک به اتاقهای مجتمع موردنظر، صحتسنجی انجام میشود.

۴- ۱- مطالعه شبکه

برای تجزیه و تحلیل نتایج ابتدا بایستی صحتسنجی نتایج انجام شود. به همین منظور محفظه دو پارامتر نرخ آزادسازی حرارت و زمان خاموشی در پژوهش لی [۳۸]، شبیه سازی شده و با نتایج اعتبار سنجی شد. این محفظه دارای اندازه ۲۴۰×۲۰۰۰×۵۳۰ سانتی متر مکعب است. منبع سوخت از نوع آتش سانتخری هپتان که در مرکز محفظه قرار داشته و دارای ابعاد ۳۰×۳۰×۲۰ سانتی متر مکعب بوده است. این محفظه از طریق درب بازشو به تهویه طبیعی دسترسی داشته و دارای ابعاد ۱۰۰×۱۹۰ سانتی متر مربع است. سیستم اطفای حریق آبی از نوع مه آب با یک نازل در مرکز تعبیه شده است که بالای منبع سوخت در ارتفاع ۲۰۰ سانتی متری قرار دارد. نازل پس از زمان ۱۰ ثانیه از ابتدای شروع فرایند احتراق عمل نموده و در مدتزمان ۲/۵ ثانیه خاموشی حاصل می شود. سایر مشخصات این مطالعه در جدول ۱ به همراه نمایی از هندسه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴- ۲- شرایط مرزی

در شکل ۳ شبکهبندی و مرز هندسه نشان داده شده است. جریان هوای داخل اتاق از طریق درب اتاق به تهویه طبیعی (محیط آزاد) ارتباط دارد و دیواره آن شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت و گرادیان صفر برای دما و گونه دارد. برای مدلسازی لازم است، ناحیهٔ محاسباتی اضافی در نظر گرفته شود و بدین صورت مطابق شکل ۳ ناحیهای در بالا و جلوی اتاق در نظر گرفتهشده است. این امر به منظور به حداقل رساندن اثر عددی، شرط آزاد^م بر جریان هوای داخل بر در سطح درب گسترشیافته است (یعنی اجازه می دهد جریان هوای داخل بر در سطح درب گسترشیافته است (یعنی اجازه می دهد جریان ورودی ایجاد کند). تعیین ابعاد دامنه محاسباتی در راستای X و Y لحاظ شده است؛ زیرا جریان هوای حاصل از محصولات خروجی احتراق به دلیل نیروی گرانشی در راستای Y حرکت می کند. به همین منظور برای دامنه عددی ۲۶۰ سانتیمتر از درب ورودی فضای بالایی در نظر گرفته و

۴- ۳- بررسی شبکه

ازآنجایی که تعداد کل سلول ها و اندازه سلول شبکه بر نتایج شبیه سازی

5 Open Boundary condition

¹ Open source

² Finit difference

³ Explicit

⁴ Pyrosim software



شکل ۲. نمایی از هندسه تجربی به همراه جزئیات [۳۸]

Fig. 2. A view of experimental geometry with details [38]

جدول ۱. پارامترهای ورودی شبیهسازی

Table 1. Simulation input parameters

مشخصات	جزئيات	پارامتر			
شبکه انتخابی ۳۶۵۸۰۰	797545.74	شبکه			
۵/۴×۳/۱×۲/۴ متر	شرايط باز	شرایط مرزی			
ضخامت بتن ديوار = ٥/٠ متر					
سطح داخلی: ضخامت فولاد = ۰/۰۰۲ متر	شنفك و ديواره	پارامتر شبکه شرایط مرزی مواد و سازهها احتراق احتراق سیستم اطفای حریق اسپرینکلر			
اندازه دهانه اصلی:					
۱/۱ عرض × ۱/۹ ارتفاع متر	ېرې				
۲۰ درجه سانتی گراد	دمای محیط				
۴۴۵۶۶ کیلوژول بر کیلوگرم	گرمای احتراق				
تابع t ² ، نزدیک شدن به زمان حداکثر به ۱ ثانیه	فرض تکامل نرخ آزادسازی حرارت	ة			
•	نرخ آزادسازی حرارت در واحد				
۲۰۰٬۰۰۰ فيلوون بر مترمربع	سطح	المعتوراني			
نرمال هپتان (C7H16)	نوع سوخت				
۰/۰۳۷ کیلوگرم بر کیلوگرم	مقدار دوده				
۰/۳ ×۰/۳	اندازه بستر سوخت				
۲۲/۴۵ لیتر در دقیقه	دبی نازل				
۲۰ درجه سانتی گراد	دمای اولیه آب				
٧/١	ضریب K	سيستم اطفاي جريق			
۱۰ بار	فشار عملياتى	المسيدية المسيدية المسيد			
۱۲۴/۶ میکرومتر	قطر متوسط قطره	اسپرينكىز			
σ = ۰/۵۲ و γ و γ = ۲/۲۲ رازین راملر لگاریتمی با	تابع توزيع قطره				
۱۰ ثانیه	زمان فعالسازي سيستم				



Fig. 3. A view of experimental geometry with details in FDS software

تأثیر می گذارد، تعداد سلول های شبکه باید از طریق تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه تعیین شود. قطر مشخصه (D*)برای یافتن تعداد بهینه سلول به صورت زیر بیان می شود [۳۹].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}_f}{\rho_{\infty}c_p T_{\infty}\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}}, \quad \frac{D^*}{dx} = 4_16 \tag{11}$$

در رابطه (۱۲) \mathbb{D}^* قطر مشخصه، \dot{Q}_f نرخ انتشار گرما، $\sigma_{\infty} \neq \mathcal{S}$ لی محیط، C_p نرخ انتشار گرما، \mathcal{D}^*/dx محیط، \mathcal{D}^*/dx محیط، \mathcal{D}^*/dx محیط است. اگر مقدار \mathcal{D}^*/dx بین ۴ تا ۱۶ باشد، نتایج شبیهسازی برای اندازه تعیین شده آتش صحیح پیش بینی شده است [۴۰] که در مطالعه حاضر این مقدار برابر با ۱۵ است. بااین حال، توصیه می شود که برای تعیین اندازه سلول ها و تعداد کل سلول ها، یک تجزیه وتحلیل حساسیت شبکه نیز جداگانه انجام شود [۳۵].

یکی از پارامترهای دیگر بهمنظور بررسی مطالعهی شبکه در روش شبیهسازی گردابههای بزرگ، استفاده از طیف انرژی کولموگرو میباشد. با توجه به این نکته که جریان حریق مورد بررسی یک جریانی اغتشاشی است، لازم است که در هر نقطه که این طیف استخراج شود، شیب ۵/۳– دیده شود. بهمنظور ترسیم طیف انرژی کولموگرو، باید که انرژی ذخیرهشده در

این گردابهها به دست آورده شود و آن را با توجه به فرکانس مرتبط با آن ترسیم نمود. ازاینرو با استفاده از آنالیز فرکانسی فوریه سهم هر گردابه با هر فرکانس (و درنتیجه آن انرژی جنبشی آن) محاسبهشده و چگالی طیفی توان^۱ آن به دست میآید. در شکل ۴ نمودار تغییرات چگالی طیفی توان بر اساس فرکانس برای نقطهی با فواصل ۶۰ ۲۰۱ و ۱۸۰ سانتیمتری از سطح بستر سوخت، آورده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده میشود، شیب نمودار چگالی طیفی توان بر حسب فرکانس با خط ۵/۳– مطابقت دارد و ازاینرو میتوان بیان کرد که شبکه مورد استفاده توانسته است که فیزیک جریان اغتشاشی حاکم را مدل سازد.

۴- ۴- صحت سنجی مدتزمان خاموشی و نرخ آزادسازی حرارت

بهمنظور صحتسنجی نتایج عددی، دو پارامتر مدتزمان خاموشی و نرخ آزادسازی حرارت بامطالعه تجربی مقایسه می گردند. در شکل ۵ نتایج نرخ آزادسازی حرارت برحسب زمان برای نتایج عددی حاضر با نتایج لی [۳۸] مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۵ مشاهده می شود، تا زمان قبل از ۱۰ ثانیه که هنوز اسپرینکلر فعال نشده است، مقدار نرخ آزادسازی حرارت در محدودهی ۲۵۰–۳۰۰ کیلووات است و بعد از اسپری آب (در زمان ۱۰ ثانیه) این مقدار به بیشینه یخود (۸۵۰ کیلووات) می رسد و بعد از آن

¹ Power Spectral Density (PSD)



شکل ۴. مطالعه شبکه – تغییرات چگالی طیفی توان بر اساس فرکانس

Fig. 4.Grid study – PSD variations based on frequency





Fig. 5. Validation of numerical results of temperature

فرآیند خاموشی آتش شروعشده و در زمان ۱۱/۵ ثانیه، احتراق کاملا خاموش می گردد. اگر به نمودار شکل ۵ دقت شود مشاهده می شود که نتایج عددی و مطالعه ی لی [۳۸] بر یکدیگر مطابقت خیلی خوبی دارند؛ به نحوی که مقدار خطا کمتر از ۱۰ درصد است و حتی نواحی بیشینه و کمینه شدن را نیز به خوبی توانسته است که مدل کند.

در جدول ۲ مدتزمانی که طول میکشد تا احتراق خاموش شود، برای نتایج عددی حاضر، تجربی و عددی لی [۳۸] آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، در شبیه سازی حاضر مدتزمان خاموشی ۳ ثانیه است که در مقایسه بازمان تجربی که ۲/۵ ثانیه است، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد که قابل قبول است.

۵- نتایج عددی

پس از صحتسنجی نتایج، اثر اسپرینکلر در مجتمع چندطبقه بررسی می گردد. به این منظور ابتدا کلیاتی از نحوه انتشار گازهای سمی و داغ در مجتمع موردنظر در حضور و عدم حضور اسپرینکلر بررسی می گردد و سپس با معرفی شاخصی برای حدود بحرانی گازهای سمی و داغ، اتاقهای در معرض مخاطره شناسایی می گردد.

۵- ۱- هندسه ساختمان چندطبقه

۲۵ هندسه موردمطالعه یک ساختمانی با کاربری تجاری-مسکونی با ۲۵ اتاق هست که اتاقهای طبقه همکف با کاربری تجاری و طبقات ۱ الی ۴

جدول ۲. مقایسه مدتزمان خاموشی

Table 2. Comparison of blackout duration

نتايج عددي حاضر	نتایج عددی لی	نتايج تجربى	رديف
۲/۷	١/٧	۲/۵	مدتزمان خاموشی (ثانیه)
۸ درصد	۳۲ درصد	-	خطای نسبی

جدول ۳. مشخصات اسپرینکلر

Table 3. Sprinkler specifications

زاويه پاشش	محدوده دمايى	تائيديه	اندازه پيچ	ضریب K	نوع اسپرينکلر
۱۴۰°	۷۹°C	UL, C-UL, FM	۱/۲" NPT	۵/۶	پايين زن

کاربری مسکونی دارد. در این هندسه از سایر جزئیات معماری ساختمان مانند راهپلهها و فضاهای مختلف صرفنظر شده و بهصورت اتاقهای ساده در نظر گرفتهشده است. تمرکز اصلی برای تجزیهوتحلیل گسترش و نشر حریق و محصولات حاصل از احتراق در بین واحدهای مجاور و طبقات بالایی است و در گام بعدی استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر برای کنترل و خاموشی آتش است. هندسه اصلی اتاق از مطالعه لی [۳۸] در نظر گرفتهشده است که در پژوهش خود این هندسه را بهصورت تک محفظهای در نظر گرفته و بهصورت تجربی و عددی اثر اطفای حریق سیستم مه آب با یک نازل را در برهمکنش پلوم آتش استخری هپتان انجام داده است.

در پژوهش حاضر این هندسه بهصورت واحدهای مستقل در قالب یک ساختمان فرض شده است. منبع سوخت و سایر پارامترهای اندازه گیری شامل حس گرهای دما، گونه و سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در طبقه همکف و در واحد سوم قرار دارد. منبع سوخت از نوع هپتان بوده و در مرکز اتاق با ابعاد ۳۰×۱۵۰×۱۵۰ سانتیمتر و اسپرینکلرها از نوع واکنش استاندارد و پایین زن (مشخصات در جدول ۳ آورده شده) در ارتفاع ۲۳۵ سانتیمتری از کف اتاق قرار دارد. مشخصات کامل اتاق به همراه جزئیات نصب تجهیزات بهتفصیل در شکل ۶ نشان داده شده است.

اسپرینکلرها پس از گذشت زمان ۱۰ ثانیه فعال خواهند شد. در نرمافزار اف دی اس، قطرات را می توان با یک توزیع تک پراکنده، تولید قطرات با همان اندازه یا با اندازههای مختلف قطرات بر اساس تابع توزیع اندازه قطره اسپری کرد [۳۵]. در مطالعه حاضر از توابع توزیع رازین راملر استفاده شد.

۵- ۲- انتشار گازهای سمی و داغ در مجتمع ساختمانی با و بدون اسپرینکلر

در این مطالعه اثرات دما، رفتار و گسترش دود و گونه سمی و داغ نظیر مونوکسید کربن بررسی و تحلیل شده است. در شکل ۷ نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت بدون اسپرینکلر و در شکل ۸ نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت با اسپرینکلر نشان داده شده است. نتایج از زمان اولیه تا ۱۰۰ ثانیه طی چهار زمان؛ اولیه، ۳۰ ثانیه، ۶۰ ثانیه و ۱۰۰ ثانیه نشان داده شده است. همچنین، محدوده دمایی نیز از ۲۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد بوده که برای تشخیص و بهتر دیده شدن در بازه ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد گرداوری شده است. در حالت اولیه درون اتاق از هوای استاندارد و کامل پر بوده است در ادامه سوخت هپتان با مخلوط شدن با اکسیژن هوا فرایند احتراق را تکمیل کرده است و گازهای داغ حاصل از احتراق که چگالی پایین تر از هوای تازه دارند به سمت



شکل ۶. الف) نمایی سهبعدی از ساختمان در نرمافزار پایروسیم، ب) نمایی سهبعدی از هندسه یک واحد در ساختمان، ج) نمایی از واحد از بالا با جزئیات نصب اسپرینکلرها، د) نمای جانبی از یک واحد ساختمان

Fig. 6. a) 3D view of the building in Pyrosim software, b) 3D view of the geometry of a unit in the building, c) View of the unit from above with details of sprinklers installation, d) Side view of a building unit

سقف اتاق منتقل می شوند. به تدریج این اتفاق باعث تشکیل یک لایه ای از گازهای داغ را در نزدیکی سقف اتاق می دهد که عمق این لایه به خروجی درب اتاق رسیده و باعث نشر به طبقات بالاتر و محیط مجاور ساختمان می شود.

هنگامی که لایه ای از گازهای داغ به درب اتاق برسد، به علت اختلاف فشاری که بین گازهای لایه داغ و محیط اطراف وجود دارد، به سمت بیرون اتاق منحرفشده و از اتاق خارج می شود که این امر در شکل ۷ و ۸ به وضوح مشخص شده است. باگذشت زمان، ارتفاع لایه دود بیشتر شده تا مرحله ای که دیگر روند پیشروی آن ثابت می شود. با ثابت شدن مقدار ارتفاع لایه دود،

آتش در اتاق به یک حالت شبهپایدار رسیده و تغییراتی در رفتار متوسط آتش دیده نمی شود.

از زمان ۵ ثانیه به بعد این محصولات احتراق بهسرعت به فضایهای داخلی سایر اتاقها رسیده که هرچه زمان بیشتر شده مقدار این محصولات نیز به بالاترین حد خود رسیده است. طبق کانتور دما شکل ۷، در زمان ۳۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد رسیده است. در زمان ۶۰ ثانیه نفوذ حرارت بیشتر از زمانهای اولیه در سایر طبقات دیده می شود؛ بطوریکه در طبقه دوم حرارت در حدود ۱۲۰ درجه سانتی گراد بوده و در طبقه سوم و چهارم به ترتیب دمای کمتری به ثبت



شکل ۷. نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت بدون اسپرینکلر



رسیده است. این نتیجه نشان میدهد هرچه طبقات از اتاق آتش فاصله گرفته است، دمای کمتری داشته و مخاطره کمتری را به دنبال دارد. با توجه به شکل مشاهده میشود که زبانههای آتش تا طبقه سوم نیز رسیده و ازنظر عرضی بعد از پایداری تا یک متر جلوی درب اتاق پیشروی داشته است.

با توجه به کانتور مونوکسید کربن که در شکل ۷ مشاهده می شود، از زمان شروع فرایند احتراق تا زمان ۳۰ ثانیه به تدریج مقدار مونوکسید کربن در اتاق افزایش پیدا کرده است؛ به طوریکه این مقدار در زمان ۳۰ ثانیه به بیشترین حد خود یعنی ۳۷۰ ppm رسیده است و باگذشت زمان این مقدار در اتاق سوم به روند تقریباً ثابت می رسد. در زمان ۱۰۰ ثانیه مقدار مونوکسید

کربن در طبقات اول و دوم مقدار ۷۵ ppm و طبقات سوم و چهارم کمتر از ۵۰ ppm گزارش شده است.

در حالت دوم این مطالعه، باهدف بررسی و تحلیل استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر و روند خاموشی آن انجام شده است که در شکل ۸ نتایج آن مشاهده میشود. سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در زمان ۱۰ ثانیه فعال سازی شده است. رفتار و چگونگی توسعه حریق همانند حالت قبل بوده و از زمان ۱۰ ثانیه به بعد است که از حالت قبل متفاوت میشود. تا ۱۰ ثانیه بعد از فعال سازی اسپرینکلر، همچنان آتش فعال است به همین علت در شکل ۸ مشاهده میشود که اگرچه در زمان ۳۰ ثانیه، دما کاهشیافته و



شکل ۸. نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت با اسپرینکلر

Fig. 8. The results of the spread of smoke and toxic and hot gases in the floors of the building in the case of sprinklers

کنترل پیک حرارت حریق انجام شده است؛ اما همچنان در این زمان حرارت ۱۰۰ درجه سانتی گراد بهدست آمده است (البته لازم به ذکر است که در زمان ۳۰ ثانیه همچنان دمای اتاق آتش نزدیک ۱۰۰ درجه سانتی گراد است؛ اما خاموشی آتش قبل از این زمان اتفاق افتاده است).

باگذشت زمان، قبل از ۶۰ ثانیه، آتش خاموش شده است؛ اما گازهای سمی و داغ در اتاقها باقیمانده که بعد از خاموشی آتش بهتدریج از اتاقها خارج میشوند. در زمان ۶۰ و ۱۰۰ ثانیه اطفای حریق و خنکسازی اتاق آتش نیز مشاهده میشود که از گسترش آتش به طبقات بعدی نیز جلوگیری شده است و به همین علت مشاهده میشود که دما و گونههای سمی در اتاقهای بالای اتاق آتش خیلی کمتر از حالت بدون اسپرینکلر است.

بهنحوی که مقدار مونوکسید کربن موجود در اتاق طبقه آخر (در زمان ۱۰۰ ثانیه) مقدار کمتر از ۱۰ ppm دارد.

۵- ۳- حالت بحرانی گازهای داغ و سمی

بهمنظور بررسی اثر گازهای سمی و داغ آتش، نیاز به شاخصی معتبر برای سنجش این موارد است. استاندارد اداره ایمنی و بهداشت حرفهای یکی از مؤسسات معتبر در زمینه ارائه این شاخصها است که مقدار بحرانی کمینه گونه سمی دیاکسید کربن را ppm ۵۰۰۰ و مونواکسید کربن را ۳۵۹– ۵۰ گزارش کرده است [۴۱]. همچنین دمای بحرانی برای شروع مخاطرات گازهای داغ برای انسان، ۳۸۸ کلوین گزارش شده است [۲۴]. جدول ۴. بیشینه مقدار دما، کربن مونواکسید و دی کسید کربن در حالت بدون اسپرینکلر (در طول ۱۰۰ ثانیه شبیهسازی)

	۵			۴			٣			٢			١		شماره اتاق (رديف)
CO ₂	CO	دما (°C)	CO ₂	CO	دما (°C)	CO ₂	СО	دما (°C)	CO ₂	CO	دما (°C)	CO ₂	CO	دما (°C)	گونەھا (ppm)
															طبقات
۵۹۱	٠	21	۲۴۷۰	۱۵/۷	88/3	177	220	۷۷۶	797	4/14	۴.	۵۹۱	٠	۲۱/۱	١
۵۹۱	٠	۲۱/۱	184	۳۱/۵	14.	۹۳۲۰۰	۱۸۵	۵۸۱	178	۳٣/۸	147	۵۹۱	٠	۲۱/۱	٢
۵۹۱	٠	۲۱/۱	717	47/1	188	۵۲۸۰۰	١٠۴	347	781	۵۰/۸	۱۹۷	۵۹۱	٠	۲۱/۲	٣
۵۹۱	•	4./4	7.1	۳۸/۹	181	841	۶۶/٨	777	240.	۳۷/۱	178	۵۹۱	•	۳۵/۴	۴

 Table 4. The maximum value of temperature, carbon monoxide and carbon dioxide in the case of without_sprinkler (during 100 seconds of simulation)

۵- ۴- تغییرات گازهای داغ و سمی در مجتمع ساختمانی

با داشتن حد بحرانی گازهای حاصل از آتش، میتوان هر یک از اتاقهای طبقات بالایی اتاق آتش را ازنظر میزان مخاطره بررسی کرد. در جدول ۴ بیشینه مقادیر دما، مونوکسید کربن و دیاکسید کربن در حالت بدون اسپرینکلر برای پنج اتاق در طبقات اول تا چهارم آورده شده است. در این جدول که در طول مدتزمان ۱۰۰ ثانیه شبیهسازی، استخراج شده است، از میزان کمینه و متوسط چشمپوشی شده است تا بهاین ترتیب بتوان با سخت گیری بیشتری مخاطرات آتش برای طبقات بالای آن را بررسی کرد.

با توجه به جدول ۴ مشاهده می گردد که دمای بیشینه اتاقهای شماره ۱ در تمامی طبقات با دمای هوای محیط اطراف تفاوتی ندارد. همچنین دمای بیشینه در اتاقهای شماره ۵ نیز تفاوت چندانی با محیط اطراف ندارد، به نحوی که در طبقه چهارم که دمای بیشینه به ۴۰ رسیده است، هیچ گونه مخاطرهای ایجاد نمی کند؛ اما زمانی که اتاقهای مرکزی (شماره۳) بررسی شود، مشاهده می گردد که دمای بیشینه بحرانی می شود. به عنوان مثال در طبقه اول (بالای اتاق آتش) دمای بیشینه اتاق سوم به ۷۷۶ درجه سانتی گراد رسیده است. البته در اتاقهای شماره سوم، هرچه از اتاق آتش فاصله گرفته می شود، دمای بیشینه کاهش می یابد که در طبقه آخر به ۲۳۷ درجه سانتی گراد می رسد.

مقادیر بیشینه گازهای سمی مونوکسید کربن و دیاکسید کربن نیز

رفتاری همچون دمای بیشینه دارد. به این صورت که شرایط گازهای سمی در اتاقهای شماره ۱ و ۵ در تمامی طبقات با محیط اطراف یکسان است. همچنین مقدار مونوکسید کربن در اتاقهای ۲ و ۴ نیز کمتر از مقدار بحرانی است و تنها اتاقهای شماره ۳ هستند که به مقدار بحرانی و بیشتر از آن رسیدهاند. اگرچه گونه کربن دیاکسید در اتاقهای ۲ و ۴ (در طبقات دوم و سوم) به مقدار بحرانی رسیدهاند. در یک جمع بندی اتاقهای شماره سوم اتاقهایی هستند که بیشتر از سایر اتاقها در معرض مخاطرات گازهای سمی و داغ قرار می گیرند. ازاین دو در تحلیلهای بعدی این اتاقها با تمرکز بیشتری موردبررسی قرار می گیرند.

با توجه به این نکته که لزوماً مقدار بیشینه گازهای سمی و داغ مخاطرهآمیز نیستند (چراکه ممکن است مقادیر بیشینه در ورودی پنجره باشد؛ حالآنکه افراد مستقر در اتاق، به سمت خروجی درب در حال ترک محل هستند) نیاز است که مقادیر کمینه و متوسط نیز بررسی گردد. به منظور بررسی دقیق تر میزان مخاطره آتش در ساختمان چندطبقه موردبررسی، هر یک از اتاقهای شماره ۳ به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده و مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط در این اتاقها مطالعه می گردد.

در شکل ۹ نمودار توزیع دمای کمینه، بیشینه و متوسط در اتاقهای شماره ۳ (بالای اتاق اَتش) برای حالت با و بدون اسپرینکلر نشان داده شده است. با توجه دمای نمودار کمینه دما در حالت با و بدون اسپرینکلر، می توان



شکل ۹. نمودار کمینه، بیشینه و متوسط دما در اتاقهای بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر



بدون اسپرینکلر باگذشت زمان، دمای کمینه، بیشینه و متوسط با شیب تقریباً ثابت افزایشی است. اما در حالت با اسپرینکلر، بعد از فعال سازی اسپری آب، دما نیز کاهشی می شود و نشان دهنده تأثیرات مثبت سیستم اطفای حریق اسپرینکلر است.

حداکثر دما در هر دو حالت مربوط به طبقه اول بوده که در حالت بدون اسپرینکلر تا نزدیک ۸۰۰ درجه سانتی گراد و با تأثیر اسپرینکلر دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است. طبقات دوم الی چهارم به ترتیب دمای کمتری را به ثبت رساندهاند؛ زیرا حرارت به طبقات بالاتر کمتر منتشر دریافت که دمای کمینه در حالت بدون اسپرینکلر در محدوده دمایی ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی گراد بوده و در حالت با اسپرینکلر این تغییرات در محدوده دمایی ۲۰–۲۰/۲۵ درجه سانتی گراد صورت گرفته است و عملاً دمای کمینه تغییری نکرده است. اما اگر به مقادیر متوسط در این اتاقها دقت شود، مشاهده می شود که در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط دما در طبقه اول و دوم به ۳۸۰ کلوین رسیده است که مقدار آن به حد بحرانی رسیده است؛ اگرچه در طبقات ۳ و ۴ به ترتیب به ۳۵۰ و ۳۲۰ کلوین رسیده است و شرایط مخاطره آمیزی در این طبقات برقرار نشده است. ضمن اینکه در حالت



شکل ۱۰. نمودار کمینه، بیشینه و متوسط دیاکسید کربن در اتاقهای بالای اتاق أتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر

Fig. 10. Curve of minimum, maximum and mean CO2 in the rooms above the fire room for the case of with_ and without_sprinklers

آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در حالت بدون اسپرینکلر کمینه مقدار دی اکسید کربن در تمامی طبقات تا زمان ۶۰ ثانیه، ۵۹۱ ۵۹۱ است که این مقدار ناشی از دیاکسید کربن موجود در هواست و این مقدار در طبقات اول و دوم بهصورت ثابت تا ۱۰۰ ثانیه ادامه داشته است؛ اما در طبقات سوم و چهارم این مقدار افزایشیافته، بهنحوی که به ترتیب ۷۶۰ و ۲۰۰۱ مست؛ اما در حالت با اسپرینکلر تا زمان ۸۰ ثانیه، مقدار mpm ۵۹۱/۴ بهصورت ثابت برای همه طبقات بوده است؛ ولی در طبقات سوم و چهارم به علت گسترش ناحیه ی پلوم آتش، مقداری افزایشی شده است. البته مقادیر بیشینه دیاکسید کربن در حالت شده است. دمای متوسط در حالت بدون اسپرینکلر در طبقات اول و دوم ۱۰۰ درجه سانتی گراد و در طبقات سوم و چهارم به ترتیب ۸۰ و ۶۰ درجه سانتی گراد و در حالت با اسپرینکلر حداکثر در ۲۰ ثانیه بیشترین مقدار مربوط به طبقه اول و دمای ۳۲ درجه سانتی گراد به ثبت رسیده است. ازاینرو در یک جمعبندی، با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما، می توان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاق ها پی برد.

با مدنظر قرار دادن حد بحرانی ۵۰۰۰ ppm، نمودار توزیع گونه دی اکسید کربن در شرایط کمینه، بیشینه و متوسط در اتاقهای شماره ۳ در بالای اتاق



شکل ۱۱. نمودار کمینه، بیشینه و متوسط مونوکسید کربندر اتاقهای بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر

Fig. 11. Curve of minimum, maximum, and mean CO in the rooms above the fire room for the case of with_ and without_sprinklers

در شکل۱۱ نتایج کمینه، بیشینه و متوسط مونوکسید کربندر اتاقهای بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر ترسیم شده است. با مدنظر قرار دادن مقدار صفر مونوکسید کربنموجود در هوا، کمینه، بیشینه و متوسط این گونه سمی همگی از صفر شروع شدهاند و باگذشت زمان زیاد شدهاند. مقدار کمینه در دو حالت با و بدون اسپرینکلر در اتاقها نزدیک صفر است (اگرچه در حالت بدون اسپرینکلر به حداکثر ۱ ppm بدون اسپرینکلر به ۱۱۲۵۰۰ ppm نیز رسیده است. این در حالی است که مقدار بیشینه در حالت با اسپرینکلر حداکثر به ۵۰۰۰۰ ppm رسیده است. اما پارامتر مهم تر از کمینه و بیشینه، مقدار متوسط است که با توجه به این مقدار در شکل ۱۰، در تمامی طبقات در حالت با اسپرینکلر، کمتر از حد بحرانی است. این در صورتی است که در حالت بدون اسپرینکلر در تمامی طبقات حالت بحرانی حاکم شده است.

	۵			۴			٣			٢			١		شماره اتاق (رديف)
CO_2	СО	دما	CO_2	CO	دما	CO_2	СО	دما	CO_2	CO	دما	CO_2	СО	دما	طبقات
_	_	_	۲۰ ثانیه	_	_	۶ ثانیه	۹ ثانیه	۶ ثانیه	_	_	_	_	_	_	١
_	_	_	۱۲ ثانیه	_	۱۰۰ ثانیه	γ ثانیه	۱۴ ثانیه	۷ ثانیه	۲۰ ثانیه	_	۷۵ ثانیه	_	_	_	٢
_	-	_	۱۱ ثانیه	_	۹۸ ثانیه	۸ ثانیه	۱۰ ثانیه	۸ ثانیه	۹ ثانیه	_	۴۴ ثانیه	_	_	_	٣
_	_	_	۱۰ ثانیه	_	۶۴ ثانیه	۹ ثانیه	۴۵ ثانیه	۱۱ ثانیه	_	_	۴۵ ثانیه	_	_	_	۴

جدول ۵. زمان رسیدن به حالت بحرانی برای دما، گازهای داغ و سمی برای حالت بدون اسپرینکلر

Table 5. Time to reach the critical state for temperature, hot and toxic gases for the state without sprinklers

بیشینه در حالت با اسپرینکلر سه برابر حد بحرانی (۵۰ ppm) رسیده است؛ درحالی که در حالت با اسپرینکلر، تنها در طبقه اول از مقدار بحرانی بیشتر شده است و از طرفی مقدار متوسط نیز در تمام طبقات حالت با اسپرینکلر کمتر از حد بحرانی است. به این ترتیب می توان گفت که طبقات بالای اتاق آتش از نظر مونو کسید کربندر مخاطره ی خاصی قرار نمی گیرند. اما در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط در تمام طبقات صعودی بوده و به حد بحرانی نزدیک می شوند که اگر زمان بیشتری به آن داده می شد، قطعاً از حالت بحرانی بیشتر خواهد شد.

در جدول ۵ زمان رسیدن به حالت بحرانی برای دما، گازهای داغ و سمی در تمام طبقات و در تمام اتاقها آورده شده است. همان طور که در این جدول مشاهده میشود، اتاقهای ۱ و ۵ در تمامی طبقات در معرض خطر خاصی از ورود گازهای سمی و داغ قرار نمی گیرند. البته باید دقت داشت که این تحلیل برای حالتی است که مجتمع ساختمانی در معرض باد قرار نگیرد (چراکه باد میتواند جهت پلوم آتش را منحرف سازد و سایر اتاقها را نیز در معرض مخاطره قرار دهد). گاز داغ و سمی کربن مونواکسید نیز مخاطرهای برای اتاقهای ۲ و ۴ ندارد؛ اما گاز دی اکسید کربن میتواند در برخی از طبقات مخاطره ایجاد کند به عنوان مثال اتاق ۲ طبقه ۲ و ۳ و یا اتاق ۴ در تمام طبقات در معرض مخاطره گازهای سمی (به خصوص دی اکسید کربن) و

داغ قرار می گیرند که حداقل بعد از ۶ ثانیه این اتفاق می افتد و از این رو با صراحت می توان بیان داشت که درصورتی که در این مجتمع (با این مقدار نرخ آزادسازی حرارت)، از اسپرینکلر استفاده نشود، تمام اتاق های بالای اتاق آتش در معرض مخاطره قرار می گیرند و بالعکس اگر از اسپرینکلر استفاده شود، تمام طبقات از حالت بحرانی گازهای سمی و داغ ایمن می شوند.

۶- جمعبندی

با روند رشد و گسترش حریق و پدیدههای مختلفی نظیر فلش آور و بک درفت در اتاق، حجم محصولات احتراق، گازهای سمی و دود افزایش پیدا کرده و به سمت طبقات بالاتر و اتاقهای مجاور حرکت و سرایت می کند. عدم بررسی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه بهمنظور عدم نشر گازهای سمی و داغ به طبقات بالا، یکی از خلأهای مطالعات پیشینه است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این موضوع، در این پژوهش در گام نخست رشد سوخت در مرکز اتاق در طبقه همکف، بدون استفاده از سیستم اطفای حریق سوخت در مرکز اتاق در طبقه همکف، بدون استفاده از سیستم اطفای حریق بررسی شده و در گام دوم تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در کنترل حریق و جلوگیری از نشر گازهای سمی و دود در طبقات بالاتر و مجاور حریق و مقایسه شده است. این نتایج شامل موارد زیر است: Case Studies in Thermal Engineering, 44 (2023) 102876.

- [4] M. Mapar, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Investigation of Two Simultaneous Fires in a Tunnel and Evaluation of the Obstructive Influence of Vehicles by Large Eddy Simulation, Modares Mechanical Engineering, 13(15) (2014) 10-22, (in Persian).
- [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 (2021) 106612.
- [6] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, The effect of vertical and horizontal air curtain on smoke and heat control in the multi-storey building, Journal of Building Engineering, 40 (2021) 102347.
- [7] 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.
- [8] R.K. Janardhan, S. Hostikka, Experiments and numerical simulations of pressure effects in apartment fires, Fire technology, 53(3) (2017) 1353-1377.
- [9] D. Cortés, D. Gil, J. Azorín, F. Vandecasteele, S. Verstockt, A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires, Applied Sciences, 10(16) (2020) 5609.
- [10] G. Heidarinejad, H. Tajaddod, M. Safarzadeh, Numerical study of the effect of the water mist nozzle location on fire extinguishing system in shielded fire, Fuel and Combustion, 15(4) (2023) 1-19, (in Persian).
- [11] G. Heidarinejad, E. Mousavi, Numerical simulatoin of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects, Modares Mechanical Engineering, 17(2) (2017) 350-358, (in Persian).
- [12] X. Ye, J. Ma, Y.-x. Shen, L.-y. Lin, Suppression effect of sprinkler system on fire spread in large commercial buildings, Procedia Engineering, 135 (2016) 455-462.
- [13] C. Fan, R. Bu, X. Xie, Y. Zhou, Full-scale experimental

۱- با صحت سنجی نتایج مشخص شد؛ نتایج عددی و تجربی بر یکدیگر مطابقت خیلی خوبی دارند به نحوی که مقدار خطا کمتر از ۱۰ درصد است و حتی نواحی بیشینه و کمینه شدن را نیز به خوبی توانسته است که مدل کند. همچنین در شبیه سازی حاضر مدتزمان خاموشی ۲/۷ ثانیه است که در مقایسه بازمان تجربی که ۲/۵ ثانیه است، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد که قابل قبول است.

۲- با توجه به نتایج دما و گونههای سمی در حالت بدون اسپرینکلر مشاهده شد؛ در زمان ۱۰۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد رسیده است در طبقه سوم و چهارم به ترتیب دمای کمتری به ثبت رسیده است. این نتیجه نشان میدهد هرچه طبقات از اتاق آتش فاصله گرفته است، دمای کمتری داشته و مخاطره کمتری را به دنبال دارد. همچنین، مقدار مونوکسید کربن در زمان ۱۰۰ ثانیه در طبقات اول و دوم، به ترتیب مقادیر ۲۲۰ و ۱۷۵ و در طبقات سوم و چهارم کمتر از ۲۰۰ ثانیه، آتش خاموش شده است. در حالت با اسپرینکلر باگذشت زمان، قبل از ۲۰ ثانیه، آتش خاموش شده است؛ اما گازهای سمی و داغ در اتاقها باقیمانده که بعد از خاموشی آتش به تدریج از اتاق ها خارج می شوند.

۳– با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما، میتوان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاقها پی برد. میتوان گفت که در حالت با اسپرینکلر، طبقات بالای اتاق آتش از نظر کربن مونواکسید در مخاطرهی خاصی قرار نمی گیرند؛ اما در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط در تمام طبقات صعودی بوده و به حد بحرانی نزدیک میشوند که اگر زمان بیشتری به آن داده میشد، قطعاً از حالت بحرانی بیشتر میشود. همچنین مقدار متوسط گونه دی اکسید کربن در تمامی طبقات حالت با اسپرینکلر، کمتر از حد بحرانی است.

منابع

- [1] M. McNamee, B. Meacham, P. van Hees, L. Bisby, W. Chow, A. Coppalle, R. Dobashi, B. Dlugogorski, R. Fahy, C. Fleischmann, IAFSS agenda 2030 for a fire safe world, Fire Safety Journal, 110 (2019) 102889.
- [2] I. Ioannou, W. Aspinall, D. Rush, L. Bisby, T. Rossetto, Expert judgment-based fragility assessment of reinforced concrete buildings exposed to fire, Reliability Engineering & System Safety, 167 (2017) 105-127.
- [3] M. Altın, M.F. Kılıçarslan, Two real room fire and the evaluation of its consequences in terms of fire safety,

Engineering, 28 (2020) 100999.

- [23] Y. Wang, K.V. Meredith, X. Zhou, P. Chatterjee, Y. Xin, M. Chaos, N. Ren, S.B. Dorofeev, Numerical simulation of sprinkler suppression of rack storage fires, Fire Safety Science, 11 (2014) 1170-1183.
- [24] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. PasdarShahri, Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(5 (Special Issue)) (2021) 3335-3350, (in Persian).
- [25] S.B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, Progress in energy and combustion science, 11(2) (1985) 119-192, (in Persian).
- [26] S. Subramaniam, Lagrangian–Eulerian methods for multiphase flows, Progress in Energy and Combustion Science, 39(2-3) (2013) 215-245.
- [27] G. Maragkos, B. Merci, Large eddy simulations of CH4 fire plumes, Flow, Turbulence and Combustion, 99 (2017) 239-278.
- [28] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Development of Compatible Subgrid Scale Model of LES in Numerical Simulation of Compartment Fires, Ph. D. Thesis, Tehran, Tarbiat Modares University, 2013, (in Persian).
- [29] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, validation, vol. 3, NIST, Spec. Publ, (2010) 1018-1015.
- [30] T. Myers, A. Trouvé, A. Marshall, Predicting sprinkler spray dispersion in FireFOAM, Fire safety journal, 100 (2018) 93-102.
- [31] R.L. Alpert, Numerical modeling of the interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes, Fire Safety Journal, 9(2) (1985) 157-163.
- [32] P. Valdes, T. Beji, B. Merci, CFD Study on the Interaction between Water Sprays and Longitudinal Ventilation in Tunnel Fires, Master's Thesis, Belgium, Ghent University, 2018.

study on water mist fire suppression in a railway tunnel rescue station: Temperature distribution characteristics, Process Safety and Environmental Protection, 146 (2021) 396-411.

- [14] R. Bellas, M.A. Gómez, A. González-Gil, J. Porteiro, J.L. Míguez, Assessment of the fire dynamics simulator for modeling fire suppression in engine rooms of ships with low-pressure water mist, Fire Technology, 56(3) (2020) 1315-1352.
- [15] Y. Yuan, S. Wu, B. Shen, A numerical simulation of the suppression of hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist, International Journal of Hydrogen Energy, 46(24) (2021) 13353-13364.
- [16] P. Nonsawat, S. Patvichaichod, Performance analysis of automatic sprinkler systems in warehouses using fire dynamic simulation, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, pp. 012005.
- [17] L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan, L. Xiaohui, Experimental research on the water mist fire suppression performance in an enclosed space by changing the characteristics of nozzles, Experimental thermal and fluid science, 52 (2014) 174-181.
- [18] Y. Liu, X. Wang, T. Liu, J. Ma, G. Li, Z. Zhao, Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist, Process Safety and Environmental Protection, 141 (2020) 344-354.
- [19] M. Bromann, The Design and Layout of Fire Sprinkler Systems, CRC Press, 2001.
- [20] M. Ahrens, US Experiences with Sprinklers. National Fire Protection Association, in, NFPA Research, Data and Analytics Division, 2017.
- [21] S.A. Abdulrahman, K. Chetehouna, A. Cablé, Ø. Skreiberg, M. Kadoche, A review on fire suppression by fire sprinklers, Journal of Fire Sciences, 39(6) (2021) 512-551.
- [22] H. Liu, C. Wang, I.M.D.C. Cordeiro, A.C.Y. Yuen, Q. Chen, Q.N. Chan, S. Kook, G.H. Yeoh, Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems, Journal of Building

impact compartment fire suppression by water mist, Annals of Nuclear Energy, 136 (2020) 107021.

- [38] J. Lee, Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening, Nuclear Engineering and Technology, 51(2) (2019) 410-423.
- [39] K.B. McGrattan, H.R. Baum, R.G. Rehm, A. Hamins, G.P. Forney, J.E. Floyd, S. Hostikka, K. Prasad, Fire dynamics simulator (version 4) technical reference guide, NIST special publication, 1018 (2004) 94.
- [40] Dreisbach and K. Hill, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Volume 3 Fire Dynamics Tools (FDT), (2007) no. C.
- [41] https://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/rightto-know/, official site of the state of new jersey, 2023.

- [33] Z.Q. Yang, S.H. Chen, X.J. Zhu, Simulation Research of the Suppressing Performance of Mist to Pool Fire in Room with Blocks, Advanced Materials Research, 518 (2012) 937-941.
- [34] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model, NIST special publication, 1018(1) (2013) 175.
- [35] T.-S. Shen, Y.-H. Huang, S.-W. Chien, Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene, Building and environment, 43(6) (2008) 1036-1045.
- [36] J. Zhang, Y. Tao, X. Liu, H. Zhao, Fire simulation research on a bus based on Pyrosim, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, pp. 012100.
- [37] J. Lee, Numerical analysis of how ventilation conditions

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم H. Tajaddod, Gh. heidarinejad, M. Safarzadeh, Numerical study of the spread of toxic and hot fire gases in a multi-story residential complex with and without sprinkler fire extinguishing system, Amirkabir J. Mech Eng., 55(11) (2024) 1277-1298.



DOI: 10.22060/mej.2024.22506.7634

بی موجعه محمد ا