

Numerical Investigation of the Effect of Smoke Curtain Height on Visibility Field and Carbon Monoxide Distribution in a Closed Parking Garage Using Pyrosim Software

Ghodrat Ghassabi*, Seyed Ehsan Shakib, Farhad Yegane

Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

ABSTRACT

Smoke curtains are of particular importance in smoke management within parking garages. In this study, the effect of increasing the smoke curtain height on changes in visibility range and carbon monoxide concentration was investigated for a commercial parking garage using Pyrosim 2024 software, a subject that has not received significant attention in previous studies. The simulation parameters included a 4 MW Heat Release Rate (HRR) and polyurethane as the fuel source, with variations in smoke curtain height considered. The simulation was performed for 10 minutes post-ignition. A numerical investigation was conducted for simulation validation. The results show that in the 2-meter smoke curtain state, visibility in the center and left side of the parking is approximately 27 to 30 meters, and between 6 to 21 meters on the right side. In this state, visibility is approximately 12% higher compared to the no-curtain state and 46% higher compared to the fully closed curtain state. The highest visibility is observed for the 2-meter curtain state, and the lowest visibility is observed for the fully closed curtain state. The results also indicate that in the fully closed curtain state, the maximum carbon monoxide concentration is between 1.5×10^{-5} and 3×10^{-5} .

KEYWORDS

Smoke curtain, Jet fan, Make-up air, Smoke extraction, Fire

* Corresponding Author: Email: ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

1. Introduction

With the rapid expansion of enclosed parking facilities, fire safety—specifically the management of smoke and toxic gases like carbon monoxide (CO)—has become a critical concern for maintaining tenable conditions and ensuring safe egress. Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling, such as PyroSim, is now a vital tool for evaluating the performance of Smoke Management Systems (SMS) in these complex environments.

Extensive research has shown that smoke accumulation and evacuation efficiency are highly sensitive to ventilation status, architectural geometry, and the integration of active and passive fire protection measures [1, 2]. In specialized underground infrastructures like metro stations and parking facilities, the strategic placement of jet fans and exhaust systems is paramount to prevent inadequate smoke clearance [3]. However, a critical design conflict exists regarding the use of smoke curtains. While essential for compartmentation, elevating smoke curtains to provide unobstructed access for emergency responders increases smoke leakage into adjacent zones.

Currently, there is a lack of comprehensive research addressing the optimal height of smoke curtains that balances smoke containment with operational accessibility. To address this gap, this study investigates the impact of varying smoke curtain heights (0 to 3 m) on smoke propagation, visibility, and CO mass fraction in a commercial parking facility using CFD simulations. The goal is to determine an optimal height that ensures effective smoke control while maintaining necessary clearances for emergency response.

2. Methodology

2.1. Numerical Modeling

The numerical simulations were performed using PyroSim, a sophisticated graphical interface for advanced fire dynamics modeling. The governing equations for smoke flow, heat transfer, combustion, and gas propagation are solved based on the principles of conservation of mass, momentum, energy, and chemical species. To capture the complex, unsteady nature of turbulent fire plumes and smoke movement, the **Large Eddy Simulation (LES)** model was employed. Unlike Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) models, LES directly resolves the large-scale turbulent eddies—which are the primary drivers of smoke and fire spread—while modeling the smaller, isotropic scales, thereby providing superior accuracy with computational efficiency.

For the combustion process, the **Mixture Fraction Model** was utilized. This model is particularly well-suited for fire simulations as it is based on the limiting factor of fuel-air mixing, offering an optimal balance between computational speed and physical accuracy in predicting flame structure and heat release. Furthermore, thermal radiation is modeled by solving the radiative transfer equation directly, and the **Beer-Lambert Law** is implemented to accurately predict smoke obscuration and its impact on visibility.

2.2. Computational Domain and Geometry

The computational domain represents a 3 m-high commercial parking facility, as detailed in Figure 1. Key components include fresh air inlets and four centrally located jet fans (both at 2.7 m elevation), smoke exhaust vents (2.6 m elevation), and smoke curtains installed along the lower boundary. The layout also incorporates structural features—an elevator, an emergency staircase, and two storage rooms—to accurately simulate the spatial constraints affecting smoke management.

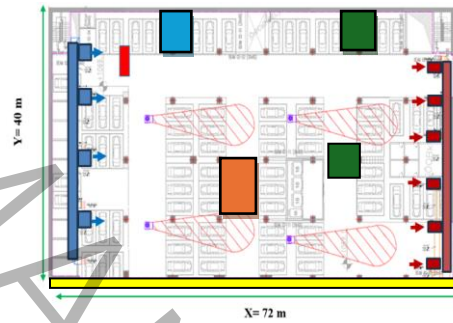


Fig. 1. Geometry and dimensions of the car park

2.3. Fire Scenario and Boundary Conditions

A realistic vehicle fire scenario was simulated, representing the combustion of a vehicle containing polyurethane. The fire is initiated at $t=1s$ and expands rapidly. The Heat Release Rate (HRR) follows a growth curve that reaches a peak of 4 MW at $t=30s$, simulating the intense thermal release of polyurethane. At $t=60s$, the fire is fully suppressed through the activation of the fire suppression system. The total simulation duration is set to 600 s (10 minutes). The exact fire location is indicated by a red rectangle in Figure 1. In the software, this is modeled using a constant heat flux boundary condition at 4 MW.

2.4. Smoke Management System (SMS) Operation

The smoke management system follows a staged activation sequence: the smoke exhaust system starts at $t=60$ s with a total flow rate of 81,600 m³/h, followed by the fresh-air supply at $t=90$ s with 42,500 m³/h, equivalent to 50% of the exhaust capacity. At $t=120$ s, the jet fans are activated to direct smoke and heat toward the exhaust vents and improve air distribution. All systems remain operational until $t=600$ s.

3. Discussion and Results

The visibility field distribution at $t=600$ s varies significantly with smoke curtain height (Figure. 2). Due to the convective flow from the fresh air inlet (left) to the exhaust vents (right), a visibility gradient is observed across the parking area. Increasing the curtain height improves visibility in the central zone by up to 33% but intensifies smoke concentration on the right side. However, higher curtains facilitate better smoke evacuation by increasing local flow pressure and exhaust velocity. Ultimately, a 2.0m curtain height provides optimal visibility, while a fully closed curtain significantly restricts visibility in both zones.

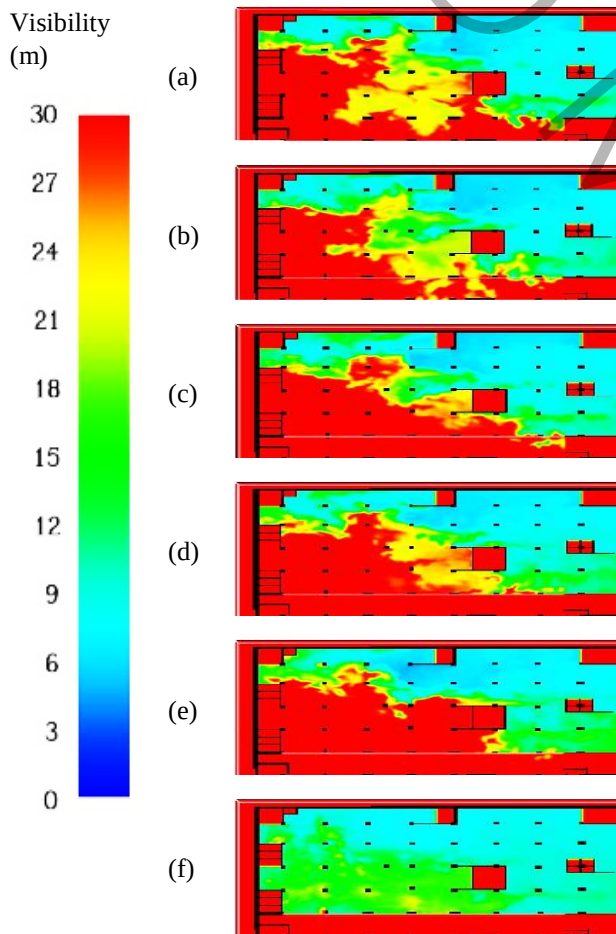


Fig. 2. Visibility distribution at $t=600$ s for different smoke-curtain heights: (a) $h=0$, (b) $h=0.5$ (c) $h=1$, (d) $h=1.5$, (e) $h=2h$, and (f) $h=3h$

The temporal profiles of average CO concentration at $z=1.8$ (Figure. 3) show a sharp rise during the first 100 s, followed by a steady decline after the SMS activation (100–200 s). While curtain heights between 0 and 2 m maintain relatively low CO concentrations ($\approx 5 \times 10^{-5}$), the 3 m fully closed curtain significantly impedes ventilation, causing CO levels to escalate to as high as 5×10^{-3} . These results demonstrate that complete closure of smoke curtains hinders transverse air movement, thereby compromising the efficiency of the smoke management system.

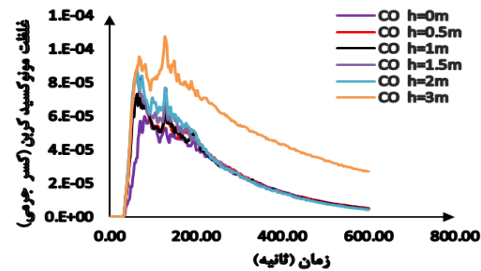


Fig. 3. Average carbon monoxide mass fraction at different times for a horizontal plane at a height of 1.8 m.

4. Conclusions

This research analyzed the effect of smoke curtain height on visibility and CO concentration in a commercial parking garage using PyroSim 2024. The results demonstrate that:

1. Increasing curtain height up to 2.0 m boosts smoke extraction velocity by reducing the exit area and creating a positive pressure effect.
2. The 2.0m curtain configuration improves average visibility by 12% over the no-curtain case and by 46% over the fully closed case.

5. Reference

- [1] W. Lin, Q. Liu, M. Zhang, B. Cai, H. Wang, J. Chen, Y. Zhou, Numerical simulation on smoke temperature distribution in a large indoor pedestrian street fire, *Fire*, 6(3) (2023) 115.
- [2] Z. Zhang, H.S. Kong, A study on the fire safety of high-rise apartments based on fire door switch and automatic fire extinguishing system, *International Journal of Advanced Culture Technology*, 9(4) (2021) 424–430.
- [3] M. Kmecová, M. Krajčík, Straková, Designing jet fan ventilation for an underground car park by CFD simulations, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(1) (2019) 39–43.

بررسی عددی اثر ارتفاع پرده دودبند سیستم مدیریت دود بر میدان دید و پخش مونوکسید کربن در یک پارکینگ بسته با استفاده از نرم افزار پایروسیم

قدرت قصابی^{*}، سید احسان شکیب، فرهاد یگانه

دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران

* ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

چکیده

پرده دودبند از اهمیت خاصی در مدیریت دود پارکینگ‌ها برخوردار است. در این مطالعه، تاثیر افزایش ارتفاع پرده دودبند بر تغییر میزان میدان دید و غلظت مونوکسید کربن با استفاده از نرم افزار پایروسیم ۲۰۲۴ برای پارکینگ یک مجتمع تجاری مورد بررسی قرار گرفت که چندان در مطالعات قبلی مورد توجه نبوده است. نتایج شبیه‌سازی با اثر ارتفاع پرده دود بند نرخ حرارت آزاد شده ۴ مگاوات و ماده سوختنی پلی اورتان در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی برای مدت ۱۰ دقیقه پس از ایجاد حریق صورت گرفت. از یک بررسی عددی جهت اعتبارسنجی شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالت پرده دودبند دومتری، میدان دید در مرکز و سمت چپ پارکینگ، تقریباً بین ۲۷ تا ۳۰ متر و در سمت راست پارکینگ بین ۶ تا ۲۱ متر می‌باشد. در این حالت میدان دید تقریباً ۱۲٪ نسبت به حالت بدون پرده دود بند و ۴۶٪ نسبت به حالت پرده کاملاً بسته بیشتر می‌باشد. بیش‌ترین میدان دید برای حالت پرده دودبند دو متری و کم‌ترین میدان دید برای حالت پرده دود بند کاملاً بسته مشاهده می‌شود. از نتایج همچنین نتیجه گرفته شد که در حالت پرده دودبند کاملاً بسته، بیش‌ترین غلظت مونوکسید کربن، بین 10^{-5} تا 3×10^{-5} می‌باشد.

کلمات کلیدی

پرده دود بند، جت فن، هوای تازه، تخلیه دود، حریق

با گسترش استفاده از پارکینگ‌های بسته در ساختمان‌های شهری، تأمین ایمنی در برابر حریق به یکی از مهم‌ترین الزامات طراحی این فضاها تبدیل شده است. در هنگام وقوع آتش‌سوزی، انتشار دود و گازهای سمی به‌ویژه مونوکسید کربن، علاوه بر کاهش میدان دید، فرآیند تخلیه ایمن افراد و عملیات امداد و نجات را با مخاطرات جدی مواجه می‌کند. از این‌رو، استفاده از سیستم‌های مدیریت دود به‌منظور کنترل و هدایت انتشار دود، حفظ شرایط قابل قبول برای تخلیه اضطراری و کاهش خطرات ناشی از حریق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی عملکرد این سیستم‌ها می‌تواند نقش مؤثری در بهبود ایمنی پارکینگ‌های بسته و طراحی بهینه سامانه‌های حفاظت در برابر حریق داشته باشد که این موضوع مورد توجه محققین قرار گرفته است.

گلاسا و همکاران [۱]، یک سینما را در نرم افزار شبیه ساز دینامیکی آتش، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که انتها و سمت چپ این سینما دارای بیش‌ترین میزان تجمع دود است و احتمال خفگی در این دو قسمت بالاست. لانگ و همکاران [۲]، یک خوابگاه دانشجویی را در نرم افزار پایروسیم شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که با باز شدن تمام پنجره‌ها، هرچه فاصله نسبت به منبع آتش کم‌تر باشد، میدان دید کم‌تر می‌شود. با پنجره بسته، دمای اتاق آتش و جریان گرما بسیار بالاتر از پنجره باز است در حالی که ارتفاع لایه دود بسیار پایین‌تر است. راهروها و پله‌های افقی بیش‌تر تحت تأثیر دود قرار می‌گیرند. وقتی همه پنجره‌ها باز می‌شوند، اتاق‌های بالا بیش‌تر تحت تأثیر دود قرار می‌گیرند. خاندوکر و همکاران [۳]، یک کارخانه تولید لباس چند طبقه را در نرم افزار پایروسیم شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که در عرض ۳ دقیقه از شروع آتش‌سوزی، دود آتش‌سوزی به سرعت از طریق راهروها و پله‌ها گسترش می‌یابد و مسیرهای فرار ساختمان را کاملاً مسدود می‌کند. به‌منظور تخلیه کامل، شرایط در طبقه اول بسیار مهم است زیرا آتش و دود متراکم، مسیرهای فرار را در عرض ۲ دقیقه احاطه می‌کند. سپس در عرض ۳ دقیقه با گسترش دود، مسیرهای فرار کاملاً مسدود شد. در این بررسی نتایج دما و مونوکسید کربن زمان مناسب برای تخلیه طبقه اول را ۱۹۸ ثانیه نشان داد. زمان تخلیه ایمن نیز حدوداً ۴ دقیقه بدست آمد. ژو و پنگ [۴]، یک دانشکده را در نرم افزار پایروسیم شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که دود در راه‌پله‌های ۱ و ۲ در طبقه دوم به ترتیب در ۶۳ ثانیه و ۷۶ ثانیه به ارتفاع بحرانی رسیده است. با وجود فاصله نسبتاً زیاد از کلاسی که حریق در آن اتفاق افتاده است، دود در راه‌پله ۳ در طبقه دوم در ۱۲۳ ثانیه به ارتفاع بحرانی رسیده و راه‌پله را غیرقابل عبور کرده است. در میان چهار خروجی تخلیه، خروجی ۱ بیشترین آسیب را از آتش‌سوزی نشان می‌دهد و از ثانیه ۸۶ غیرقابل عبور می‌شود. به جز کلاس درس مربوط به آتش‌سوزی، سایر خروجی‌ها و راه‌پله‌های طبقه اول تحت تأثیر قرار گرفتند. ژانگ و همکارانش [۵]، با مطالعه ایمنی آتش‌سوزی ساختمان‌های مسکونی مرتفع دریافتند که بستن راهروی آتش‌نشانی می‌تواند سرعت انتشار دود را به‌طور مستقیم از طریق راهرو به سمت بالا کاهش دهد، اما امکان ورود دود به راه‌پله را فراهم می‌کند. وانگ و همکارانش [۶]، با شبیه‌سازی یک مرکز خرید زیرزمینی در پایروسیم دریافتند که تعداد افرادی که می‌خواهند از ساختمان خارج شوند با زمان تخلیه رابطه مثبت دارد و عرض خروجی امن با زمان تخلیه رابطه منفی دارد، اما تأثیر تعداد افراد بر زمان تخلیه به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از زمان خروج ایمن است. لیائو و همکاران [۷]، شهر زیرزمینی گوانگژو را با استفاده از نرم افزار پایروسیم و پس‌فایندر شبیه‌سازی کردند، نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار پایروسیم نشان داد که با شروع آتش‌سوزی در منطقه اول، زمان تخلیه ایمن و در دسترس برای مردم ۵۳۰ ثانیه است که تمام امکانات آتش‌نشانی غیر فعال می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار پس‌فایندر نشان داد که زمان تخلیه افراد از منطقه دو، ۱۴۳ ثانیه طول می‌کشد که با توجه به زمان تخلیه ایمن (۵۳۰ ثانیه) مناسب می‌باشد. لین و همکاران [۸]، به شبیه‌سازی عددی توزیع دمای دود در آتش‌سوزی بزرگ در معابر عابر پیاده سرپوشیده با استفاده از نرم افزار پایروسیم پرداختند. نتایج نشان داد سرعت انتشار دود با افزایش سرعت انتشار حرارت منبع آتش‌سوزی افزایش می‌یابد و ضخامت لایه دود پایدار نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که سیستم خروجی دود فعال می‌شود، حجم دود به سرعت کاهش می‌یابد، ضخامت لایه دود کاهش و میزان دید افزایش می‌یابد. هر چه میزان انتشار حرارت منبع آتش بیشتر باشد، میانگین دمای دود بالاتر می‌رود. هنگامی که سیستم خروج دود روشن می‌شود، دمای دود کاهش و مرحله تثبیت دمای دود کوتاه می‌شود. بولینا و همکاران [۹]، یک تحلیل عددی از ساختمان‌هایی با ارتفاع سقف متغیر تحت سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در پایروسیم با قرار دادن

مشعل‌ها در گوشه‌های اتاق و تنظیم مقادیر مختلف حرارت انجام دادند. نتایج نشان داد که با پیشرفت فرآیند احتراق، حرارت آزاد شده از حریق باعث گرم شدن هوای اطراف می‌شود و دود حاصل از احتراق به سمت بالا پخش می‌شود. ژو و همکارانش [۱۰]، به طور مشترک یک مدل تخلیه آتش ساختمان‌های مدارس قدیمی را با استفاده از پایروسیم و پت فایندر شبیه‌سازی کردند. مطالعه موردی نشان می‌دهد که بازده تخلیه ساختمان قدیمی مدرسه بدون آب پاش تا ۱۲/۱ درصد کاهش می‌یابد و تخلیه افراد در وضعیت خطرناک بدون تخلیه دود مکانیکی است که داشتن خروجی‌های بیشتر تاثیر کم‌تری بر بهبود کارایی تخلیه افراد دارد. لی و همکارانش [۱۱ و ۱۲]، به شبیه‌سازی تخلیه اضطراری خیابان‌های تجاری زیرزمینی با استفاده از پایروسیم و پت فایندر پرداختند. سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در چهار منطقه حفاظت شده از آتش‌سوزی و نامطلوب‌ترین منابع آتش‌سوزی در این مدل تنظیم شدند. براساس تعداد محاسبه شده افراد در شروع آتش‌سوزی، مسیرهای حرکتی مختلف، پیکربندی پله‌ها و عرض خروجی شبیه‌سازی شدند. انشخاب مسیرهای فرار و مکان‌های ازدحام توسط تصاویر گرافیکی برنامه‌های شبیه‌سازی شناسایی شدند. زمان مورد نیاز برای خروج ایمن با زمان خروج ایمن در دسترس، مقایسه شدند و تعداد کسانی که موفق به خروج از ساختمان شده توسط پت فایندر محاسبه شدند. اثرات سه شکل پله فرار بر استفاده از فرار و نرخ تخلیه مورد ارزیابی قرار گرفت و بازده تخلیه آن‌ها رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که بازده پله معمولی بیشتر از راه‌پله مستقیم، و راه‌پله مستقیم بیشتر از راه‌پله موازی-دو طرفه است. وانگ و همکاران [۱۳]، به شبیه‌سازی تخلیه دود آتش و تخلیه پرسنل در ساختمان‌های پزشکی در مقیاس بزرگ پرداختند. در این مطالعه از ترکیب پایروسیم و پت فایندر و تخلیه پرسنل و گروه‌های متعدد، مانند بیماران با مشکلات تحرک و پرسنل امداد و نجات، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زمان تخلیه به میزان ۲۳ درصد کاهش می‌یابد و افزودن نردبان‌های آتش‌نشانی خارجی یک تخلیه هماهنگ چند کاناله را تشکیل می‌دهد و زمان تخلیه کل را از ۱۷۸۰ ثانیه به ۱۲۶۶ ثانیه کاهش می‌دهد. ژانگ و همکاران [۱۴]، تاثیر تاسیسات آب پاش و مانع دود بر تخلیه آتش در ساختمان‌های آپارتمانی را در نرم افزار پایروسیم بررسی کردند، نتایج نشان می‌دهد که آب‌پاش‌ها به تنهایی زمان خروج ایمن موجود را از ۹۲ ثانیه به ۱۵۴ ثانیه افزایش می‌دهند، در حالی که مانع دود آن را به ۱۱۵ ثانیه افزایش می‌دهند. استفاده ترکیبی از آب‌پاش‌ها و مانع دود ۶۰ سانتی متری با فاصله ۵ متر، به زمان خروج ایمن ۴۲۰ ثانیه دست می‌یابد. لیو و همکاران [۱۵]، به تجزیه و تحلیل علت آتش‌سوزی‌های شدید مسکونی با استفاده از شبیه‌سازی پایروسیم پرداختند. اثرات سرعت باد محیط و توزیع دمای اتاق و غلظت مونوکسید کربن بر زمان آژیر آتش‌سوزی تحلیل شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت باد محیط، زمان مورد نیاز برای کاهش سرعت، دما و مقادیر غلظت مونوکسید کربن برای رسیدن به آستانه هشدار به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به طور خاص، هنگامی که سرعت باد محیط ۱۰ متر بر ثانیه است، زمان هشدار به ترتیب ۴/۸، ۱/۴۵ و ۱/۷۶ برابر افزایش می‌یابد.

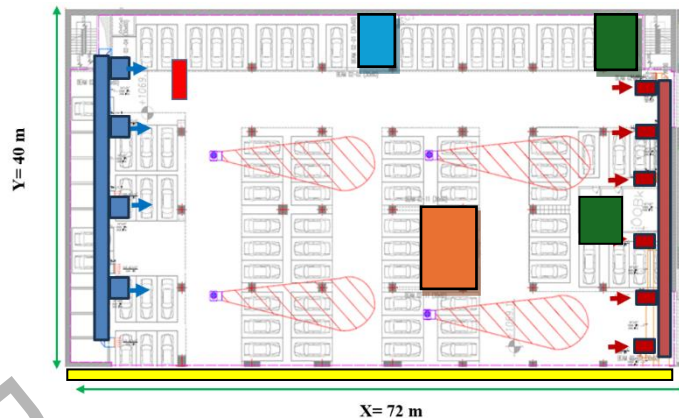
گئو و همکاران [۱۶]، به شبیه‌سازی یک ایستگاه مترو و بررسی گسترش دود با استفاده از تهویه مکانیکی و طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که تهویه مکانیکی مانع گسترش دود در راستای عمودی می‌شود اما در راستای افقی تاثیر کمی دارد. پن و همکاران [۱۷]، با مطالعه روش‌های موثر خروجی دود در ایستگاه‌های مترو و انتخاب مکان‌های مختلف منبع آتش‌نشانی برای تجزیه و تحلیل تغییرات دما، میدان دید و غلظت مونوکسید کربن، به این نتیجه رسید که سیستم خروجی دود مکانیکی نقشی کلیدی در پارامترهای موثر دارد. جیاچتی و همکاران [۱۸]، تعامل بین جریان گاز ناشی از شناوری به سمت بالا و جابجایی اجباری در تهویه مکانیکی را با استفاده از آزمایش‌های عملی مورد مطالعه قرار دادند و استراتژی تهویه بهینه را در صورت آتش‌سوزی در ایستگاه مترو تعیین کردند. کمکوا و همکاران [۱۹]، یک پارکینگ زیرزمینی خودرو را در نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند. در حالت اول یک فن خروج دود در گوشه بالا سمت راست و یک فن در گوشه پایین سمت چپ قرار گرفت و هوا توسط جت فن‌ها به سمت فن‌های تخلیه دود هدایت می‌شوند و نرخ تبادل هوا ۱۰ بار در ساعت بود. در حالت دوم هر دو فن تخلیه دود در سمت راست پارکینگ قرار گرفت و نرخ تبادل هوا ۱۵ بار در ساعت بود. نتایج نشان داد که میدان دید در حالت دوم نسبت به حالت اول بیشتر می‌باشد و دود کاملاً تخلیه شده است، در حالی که در حالت اول بعد از گذشت ۶۰۰ ثانیه از حریق، هنوز دود در پارکینگ قابل مشاهده است و به اندازه کافی تهویه مناسب انجام نشده است. بررسی‌ها نشان داد که مکان مناسب عناصر سیستم تهویه برای دستیابی به کارایی بالای تهویه آتش بسیار مهم

است. قضابی و همکاران [۲۰]، به شبیه‌سازی عددی تاثیر سناریوهای مدیریت دود بر قابلیت میدان دید در پارکینگ خودرو پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که میدان دید در تمام سناریوها پس از ۴۲۰ ثانیه به سطح قابل قبولی می‌رسد. بررسی آنها نشان داد که تاخیر در فعال شدن سیستم‌های مدیریت دود یک استراتژی موثر برای تسهیل خروج دود و ورود هوای تازه است.

پرده‌های دودبند، به عنوان یکی از اجزای کلیدی در سیستم‌های مدیریت دود پارکینگ‌های وسیع، نقش مؤثری در تفکیک ناحیه‌های حریق و کنترل انتشار دود ایفا می‌کنند. با این حال، حفظ کارایی این تجهیزات با الزامات عملیاتی آتش‌نشانی، از جمله ضرورت وجود فضای آزاد در زیر پرده برای دسترسی نیروهای امدادی، در تضاد است؛ چرا که افزایش ارتفاع پرده از سطح زمین، منجر به گسترش لایه دود به نواحی دیگر و کاهش اثربخشی سیستم می‌شود. از این رو، تعیین ارتفاع مناسب برای پرده‌های دودبند به منظور ایجاد موازنه میان قابلیت دسترسی و کنترل دود، ضرورت دارد که در مطالعات قبلی مورد توجه قرار نگرفته است. مطالعه حاضر با هدف پر کردن شکاف‌های پژوهشی موجود، به بررسی تأثیر تغییرات ارتفاع پرده دودبند بر پارامترهای کلیدی نظیر گسترش دود، توزیع میدان دید و کسر جرمی مونوکسید کربن در یک پارکینگ تجاری می‌پردازد. برای این منظور در این مطالعه، اثر ارتفاع پرده دود بند، برای مقادیر صفر تا ۳ متر بر میدان دید و کسر جرمی مونوکسید کربن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- تعریف مسئله، معرفی هندسه و شرایط مرزی

در شکل ۱، هندسه، ابعاد و محل قرارگیری دریچه‌های هوای ورودی (آبی رنگ، سمت چپ تصویر) در ارتفاع ۲/۷ متر، ۴ جت فن در بخش میانی پارکینگ در ارتفاع ۲/۷ متر، دریچه‌های تخلیه دود (قرمز رنگ، سمت راست) در ارتفاع ۲/۶ متر، محل پرده دود بند (زرد رنگ، ضلع پایینی پارکینگ)، آسانسور (نارنجی رنگ، مرکز پارکینگ)، پله فرار (آبی رنگ، در وسط ضلع بالایی پارکینگ)، دو انباری (سبزرنگ در سمت راست بالا و مرکز) نشان داده شده است. ارتفاع پارکینگ نیز ۳ متر می‌باشد. مدل حریق نیز بر پایه یک سناریوی واقعی و شبیه‌سازی شده از آتش‌سوزی خودرو طراحی شده است، که در آن آتش‌سوزی از ثانیه ۱ آغاز شده و به سرعت گسترش می‌یابد. نرخ آزادسازی حرارت این حریق که معادل سوختن یک خودرو حاوی پلی‌یورتان است، در ثانیه ۳۰ ثانیه به اوج خود یعنی ۴ مگاوات می‌رسد و با فعال شدن سیستم‌های اطفای حریق، در ثانیه ۶۰ ثانیه به طور کامل مهار و خاموش می‌شود. مدت زمان کلی شبیه‌سازی ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. محل دقیق وقوع آتش‌سوزی در پارکینگ در شکل ۱ (مستطیل قرمز رنگ) نشان داده شده است که در نرم افزار پایروسیم، با شرط مرزی شار ثابت، حرارت با توان ۴ مگاوات را ایجاد می‌نماید. شرایط اولیه محیط شامل دمای هوا برابر ۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار استاندارد جو ۱۰۱ کیلوپاسکال و غلظت اکسیژن ۲۱ درصد می‌باشد. با آغاز فرآیند اطفای حریق در ثانیه ۶۰، فن‌های تخلیه دود در نرم افزار با شرط مرزی فن تخلیه و با ظرفیت جابه‌جایی ۸۱۶۰۰ متر مکعب در ساعت (شامل ۶ دریچه با ابعاد ۱×۰/۳۵ متر) به منظور پاکسازی هوای پارکینگ و جلوگیری از تجمع دود فعال می‌شوند و تا پایان تحلیل در ثانیه ۶۰۰ همچنان به مکش ادامه می‌دهند. در ثانیه ۹۰، که برابر با ۳۰ ثانیه پس از فعال‌سازی فن‌های تخلیه دود است، فن‌های تامین هوای تازه در نرم افزار با شرط مرزی فن تامین هوای تازه نیز وارد مدار شده و با ظرفیت ۴۲۵۰۰ متر مکعب در ساعت (شامل ۴ دریچه به ابعاد ۱×۰/۳ متر) شروع به دمیدن هوای پاک از طریق دریچه‌های مربوطه می‌کنند. این فن‌ها با هدف جایگزینی هوای آلوده پارکینگ تا پایان مدت تحلیل یعنی ثانیه ۶۰۰ فعال است. در نهایت، جت فن‌های پارکینگ در ثانیه ۱۲۰ فعال می‌شوند تا جریان هوای قوی را ایجاد کرده و دود و حرارت را به سمت دریچه‌های تخلیه هدایت کنند. این فن‌ها همچنین وظیفه توزیع یکنواخت هوای تازه را دارند و فعالیت‌شان تا پایان ثانیه ۶۰۰، ادامه می‌یابد تا تهویه کامل پارکینگ تضمین گردد. مطابق ضوابط سازمان آتش‌نشانی، ظرفیت فن‌های تخلیه دود برای تعویض ۱۰ بار در ساعت می‌باشد، ظرفیت فن‌های هوای تازه نیز ۵۰ درصد فن تخلیه دود می‌باشد. در این مطالعه، اثر ارتفاع پرده دود بند، برای مقادیر صفر تا ۳ متر بر میدان دید و کسر جرمی مونوکسید کربن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۱ هندسه و ابعاد پارکینگ

Fig. 1. Geometry and dimensions of the car park

۳- مدل سازی عددی

در نرم افزار پائروسیم که رابط گرافیکی نرم افزار شبیه ساز دینامیکی حریق^۱ است، جریان دود، انتقال حرارت، احتراق و انتشار گازها با معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی و گونه های شیمیایی و به روش حجم محدود شبیه سازی می شوند. در نرم افزار شبیه ساز دینامیکی احتراق، برای شبیه سازی جریان آشفته از مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ^۲ استفاده شده است. زیرا گردابه های بزرگ که عامل اصلی گسترش دود و آتش حریق است در این مدل مستقیم حل می شود و گردابه های کوچک را این مدل تخمین می زند در نتیجه حجم محاسبات را نیز کاهش می دهد. برای شبیه سازی احتراق از مدل احتراق کسر مخلوط^۳ استفاده شده است. زیرا این مدل بر مبنای محدودیت اختلاط سوخت و هواست که در آتش سوزی ها حائز اهمیت است و این مدل دارای دقت قابل قبول و محاسبات سریع می باشد. همچنین در این نرم افزار، مدل سازی تابش حرارتی با حل مستقیم معادله انتقال تابش انجام شده است و معادله بیرلامبرت نیز برای پیش بینی دقیق تر میدان دید و رفتار دود به کار می روند [۲۱].

معادله پیوستگی (معادله بقاء جرم)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم در جهت X

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'}) \quad (2)$$

معادله مومنتوم در جهت Y

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \rho \overline{v'v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \overline{v'w'}) \quad (3)$$

¹ Fire Dynamics Simulator (FDS)

² large eddy simulation

³ Mixture Fraction Combustion Model

معادله مومنوم در جهت Z

$$\rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \rho \overline{w'^2}) \quad (4)$$

در معادله (۴)، ρ چگالی هوا، t زمان، و u بردار سرعت با مؤلفه‌های u ، v و w در راستاهای x ، y و z است. همچنین p فشار، μ ویسکوزیته سینماتیکی است. برای شبیه‌سازی تنش‌های آشفتگی معادله مومنوم با استفاده از مدل گردابه‌های بزرگ، ویسکوزیته گردابه ای توسط معادله زیر تعیین می‌شود [۲۲]:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |S| \quad (5)$$

در معادله (۵)، S تانسور نرخ کرنش است و L_s طول اختلاط است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:

$$L_s = \min(kd, C_s V^{\frac{1}{3}}) \quad (6)$$

در معادله (۶)، kd ثابت ون کارمن، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره و V حجم سلول محاسباتی است.

معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \overline{w'T'}) + q_r \quad (7)$$

در معادله (۷)، ρ چگالی هوا، t زمان، و u بردار سرعت با مؤلفه‌های u ، v و w در راستاهای x ، y و z هستند. همچنین T دما، α ضریب پخش حرارتی و q_r منبع تولید گرما از حریق را نشان می‌دهد.

معادله انتقال گونه‌های شیمیایی

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{w}_i \quad (8)$$

در معادله (۸)، پارامتر Y_i نشان‌دهنده نسبت جرم یک گونه شیمیایی به چگالی کل مخلوط سیال در یک نقطه مشخص است. D_i ضریب نفوذ گونه‌ی i و w_i نرخ تولید یا مصرف همان گونه بر اثر واکنش شیمیایی است [۲۱].

در نرم‌افزار شبیه ساز دینامیکی حریق، میدان دید بر اساس قانون بیرلامبرت محاسبه می‌شود که شدت نور عبوری را تابعی از طول مسیر و ضریب خاموشی دود بیان می‌کند [۲۱].

معادله‌ی کلی قانون بیرلامبرت به صورت زیر است [۲۱]:

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\sigma L} \\ \sigma &= K_m \rho Y_s \\ S &= \frac{-\ln(\tau^*)}{\sigma} \end{aligned} \quad (9)$$

در معادله (۹)، I_0 شدت اولیه نور و I شدت نور پس از عبور از دود است که واحد هر دو وات بر متر مربع می‌باشد. L طول مسیر نور (متر)، σ ضریب خاموشی دود (بر متر)، K_m ضریب خاموشی جرمی (متر مربع بر کیلوگرم)، ρ چگالی گاز (کیلوگرم بر متر مکعب) و Y_s کسر جرمی دود است. با ترکیب روابط پیشین، میدان دید S بر حسب متر به دست می‌آید. نسبت I به I_0 با τ^* بیان می‌شود که نشان‌دهنده شفافیت نسبی محیط یا آستانه دیدپذیری است [۲۱].

در مدل‌سازی، جریان تراکم ناپذیر فرض شده است و بصورت گذرا شبیه‌سازی انجام می‌شود و سطوح جانبی، آدیاباتیک لحاظ شده است. قبل از بررسی نتایج لازم است، اندازه مناسب سلول شبکه بر اساس روابط شبکه‌بندی و با توجه به پارامترهای کلیدی حریق تعیین گردد. رابطه زیر برای این منظور استفاده شده است [۲۱]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (10)$$

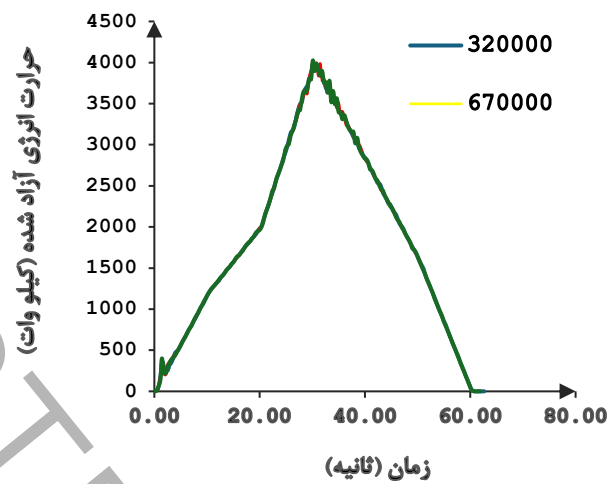
در معادله (۱۰)، D^* قطر مشخصه آتش است برای تعیین اندازه بهینه سلول شبکه، پارامترهای حریق شامل نرخ انتشار حرارت $\dot{Q}$ ۴ مگاوات (معادل حریق یک خودرو با سوخت پلی‌یورتان مطابق استاندارد BS 7346-7)، چگالی هوا $\rho_{\infty} = 1/204 \text{ kg/m}^3$ ، گرمای ویژه $C_p = 1/005 \text{ kJ/kg.K}$ ، دمای محیط ۲۷۳ کلوین و شتاب گرانش $g = 9/81 \text{ m/s}^2$ در نظر گرفته شد. بر اساس راهنمای شبیه‌ساز دینامیکی حریق، نسبت D^*/dx باید بین ۴ تا ۱۶ باشد که طبق مقادیر فوق، محدوده مناسب سلول شبکه ۱۰/۴۴ تا ۴۱/۷۴ سانتی‌متر به دست می‌آید [۲۱]. در ادامه، استقلال نتایج از تعداد شبکه محاسباتی با توجه به محدوده مناسب برای اندازه سلول شبکه بین ۱۰/۴۴ تا ۴۱/۷۴ سانتی‌متر، بررسی شده است. چهار شبکه محاسباتی با ابعاد سلول‌های ۲۶، ۲۰، ۱۶ و ۱۴ سانتی‌متری، که مجموعاً به ترتیب شامل ۳۲۰،۰۰۰، ۶۷۰،۰۰۰، ۱،۲۰۰،۰۰۰ و ۱،۹۰۰،۰۰۰ سلول می‌باشد در شکل ۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات حاصل از اندازه شبکه، تاثیر زیادی بر نتایج ندارد، بنابراین به جهت کاهش حجم محاسبات، از نتایج تعداد شبکه ۳۲۰،۰۰۰، برای حل این مسئله استفاده شده است. در شکل ۳ نمایی از شبکه بندی پارکینگ نشان داده شده است.

در شکل ۴، برای ارزیابی صحت مدل‌سازی، شبیه‌سازی برای یک فضای بسته مطابق با اطلاعات مرجع [۲۳] که در جدول ۱ درج شده است، انجام شد و نتایج این شبیه‌سازی با نتایج مرجع [۲۳] مقایسه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مقادیر دما روند حرارتی مشابهی را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که دما از مقدار اولیه حدود ۲۰ درجه سلسیوس با شیبی تند افزایش یافته و پس از ۵۰ ثانیه در محدوده ۴۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس پایدار می‌شود. اختلاف میانگین دما در حالت پایدار تنها ۱ تا ۲ درجه بوده که بیانگر دقت مناسب شبیه‌سازی رفتار حرارتی حریق است. این مقایسه کمی و کیفی نشان می‌دهد نحوه شبیه‌سازی از اعتبار لازم برخوردار بوده و توانایی پیش‌بینی شرایط حرارتی در محیط‌های بسته را دارد.

جدول ۱: شرایط مرجع [۲۳]

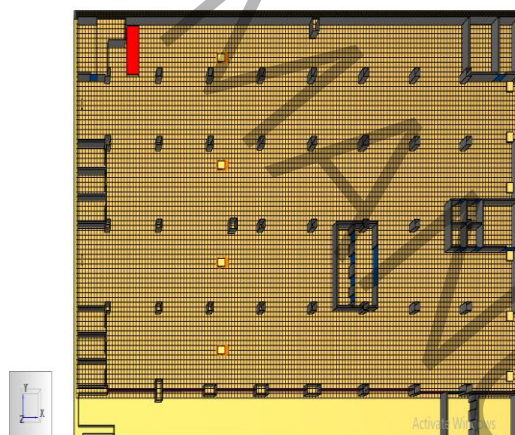
Table 1. Reference conditions [23]

مقدار	متغیر
۵/۶×۳/۶×۲/۹	ابعاد (متر)
۴۰	توان حریق (کیلووات)
۶۰۰	مدت زمان شبیه‌سازی (ثانیه)



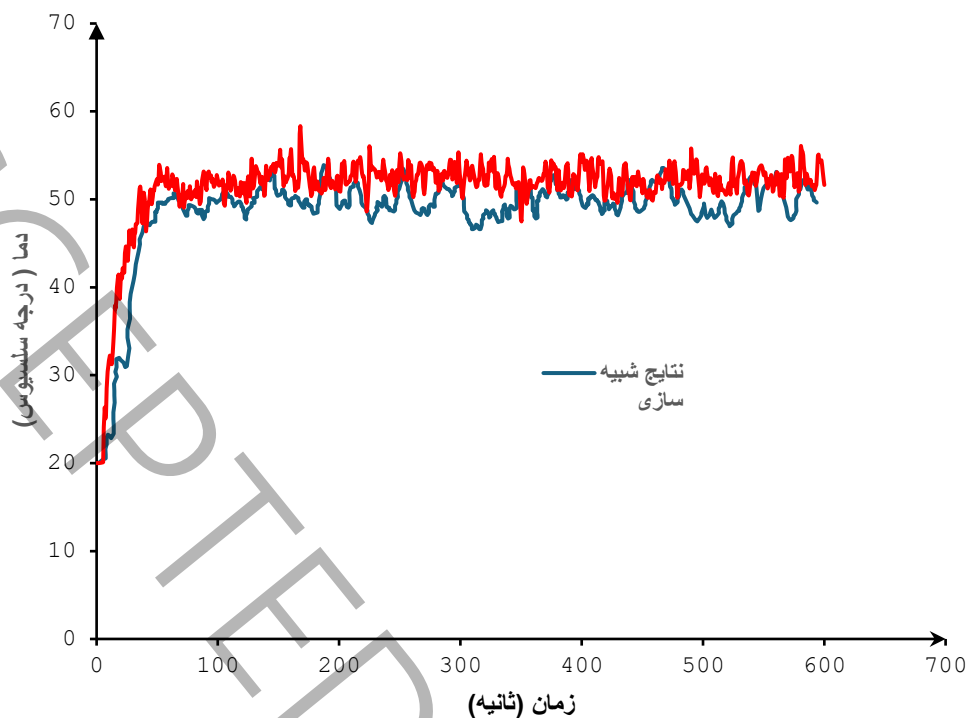
شکل ۲ نمودار استقلال از شبکه

Fig. 2. Grid independence plot



شکل ۳ شبکه بندی پارکینگ

Fig. 3. Computational mesh of the parking



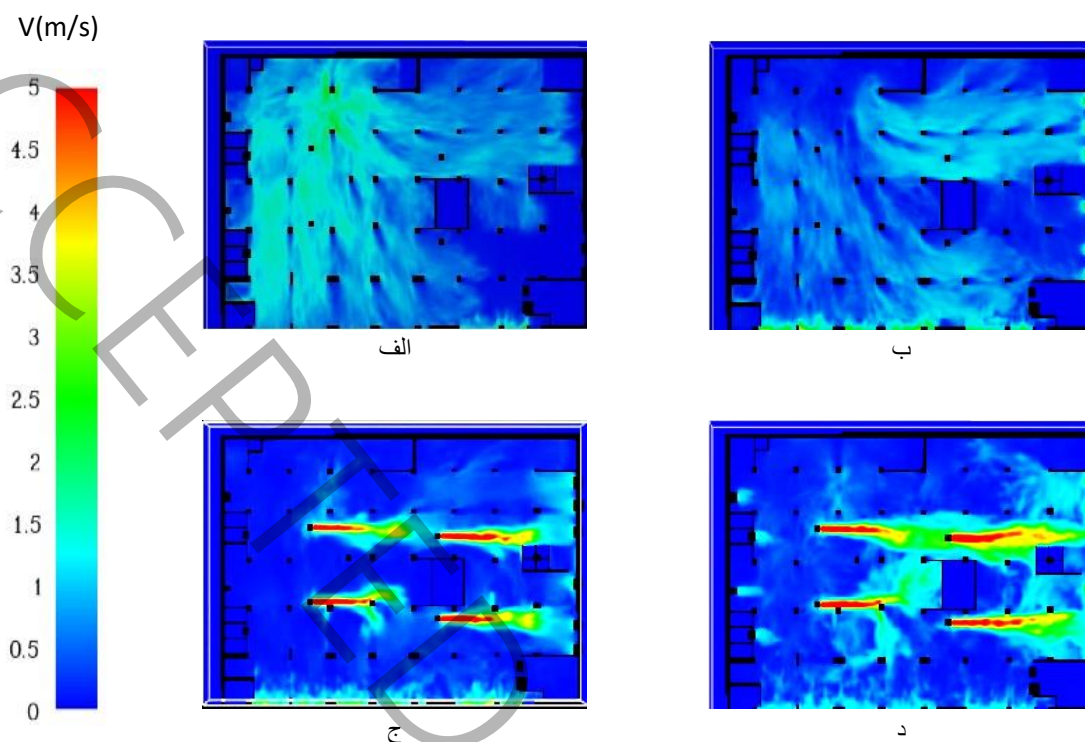
شکل ۴ مقایسه نتایج شبیه سازی و مرجع ۲۳

Fig. 4. Comparison of the simulation results with reference [23]

۴-نتایج

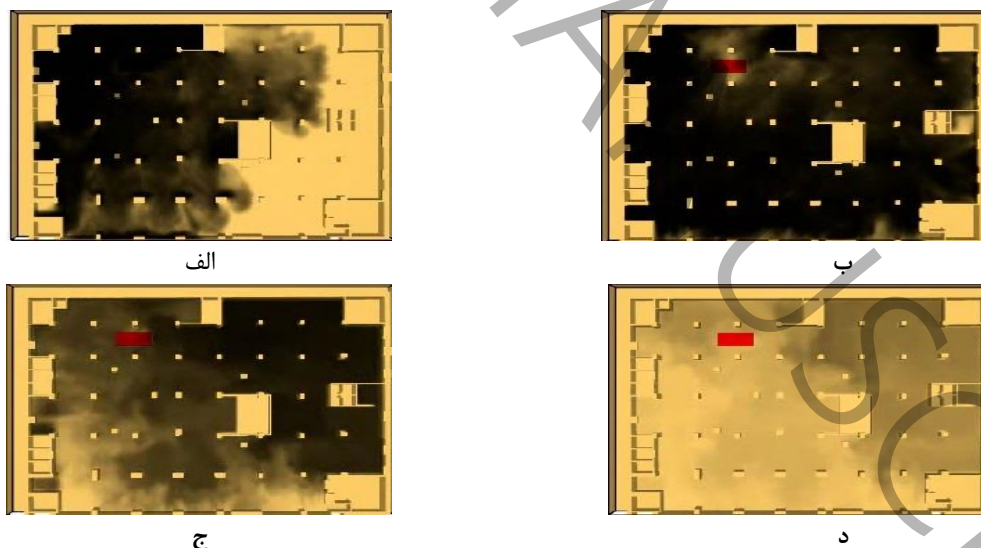
در شکل ۵ سناریو دود و نحوه و زمان فعال سازی فن های هوای تازه، فن های تخلیه دود و جت فن ها بیان شده است. حالت (الف) سرعت جریان حریق و دود را در زمان ۵۰ ثانیه نشان می دهد. در این حالت هیچ کدام از فن ها فعال نمی باشد و جریان دود تنها در اثر جابجایی طبیعی ناشی از حریق در پارکینگ گسترش می یابد و بیشترین سرعت دود بین ۲/۵ تا ۳/۵ متر بر ثانیه می باشد. در حالت (ب) سرعت جریان دود را در زمان ۶۵ ثانیه نشان می دهد، مشاهده می شود که در این حالت، در ناحیه ایجاد حریق، سرعت کاهش قابل توجهی یافته است. همچنین به دلیل اینکه، فن های تخلیه فعال شده است، سرعت جریان ورودی به فن های تخلیه دود که در سمت راست پارکینگ قرار گرفته اند، افزایش یافته و حدوداً ۲/۵ متر بر ثانیه می باشد. در این حالت، در نزدیکی پرده دود بند نیز به دلیل کاهش سطح مقطع خروجی یک جریان با سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه ایجاد شده است. در حالت (ج) سرعت جریان در زمان ۱۲۵ ثانیه نشان داده شده است. مشاهده گردید که جت فن ها فعال شده و سرعت جریان خروجی از جت فن ها بین ۴/۵ تا ۵ متر بر ثانیه می باشد. در حالت (د) سرعت جریان را در زمان ۱۸۵ ثانیه نشان می دهد، مشاهده گردید در این حالت فن های هوای تازه وارد مدار شده و سرعت جریان خروجی از فن های هوای تازه که در سمت چپ پارکینگ قرار دارند، حدوداً ۱/۵ متر بر ثانیه می باشد. در این حالت، فعال سازی فن های هوای تازه سبب بهبود خروج جریان در جت فن ها گردیده است. همچنین در این حالت، مشاهده می شود، فعال شدن جت فن های نزدیک دریچه های تخلیه سبب می شود سرعت جریان ورودی به دریچه های تخلیه تا ۳ متر بر ثانیه افزایش یابد.

توزیع غلظت دود در محیط پارکینگ مورد مطالعه، در چهار بازه زمانی کلیدی (۴۰، ۱۲۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ ثانیه پس از وقوع حریق) در شکل ۶ نشان داده شده است. در (حالت الف)، که ۴۰ ثانیه از شروع ایجاد حریق گذشته است، مشاهده می شود که دود به دلیل عدم انتشار کامل و عدم فعال شدن سیستم مدیریت دود، به شدت در ناحیه چپ پارکینگ متمرکز شده و سمت راست پارکینگ عاری از دود است. در حالت (ب) که ۱۲۰ ثانیه از شروع حریق می گذرد، با فعال شدن فن های تخلیه دود و جت فن ها، دود به سمت فن های تخلیه جریان یافته و به صورت نسبتاً یکنواخت در تمامی فضای پارکینگ توزیع می گردد. مطابق شکل در حالت (ج)، که ۳۰۰ ثانیه از شروع حریق می گذرد، در این زمان، از فعال شدن فن های هوای تازه نیز ۱۲۰ ثانیه گذشته است و ورود هوای تازه، منجر به تغییر الگوی توزیع دود می گردد؛ به گونه ای که دود به تدریج از سمت چپ به سمت راست هدایت شده و غلظت آن در ناحیه منبع حریق کاهش می یابد. در حالت (د) که ۶۰۰ ثانیه از حریق می گذرد، عملکرد سیستم مدیریت دود منجر به تخلیه مؤثر حجم قابل توجهی از گازهای حاصل از حریق شده و کاهش چشمگیر غلظت دود در کل محیط پارکینگ را نمایش می دهد.



شکل ۵ توزیع سرعت هوا در پارکینگ در زمان، الف) ۵۰، ب) ۶۵، ج) ۱۲۵، د) ۱۸۵ ثانیه

Fig. 5. Air velocity distribution in the parking at (a) 50 s, (b) 65 s, (c) 125 s, and (d) 185 s.

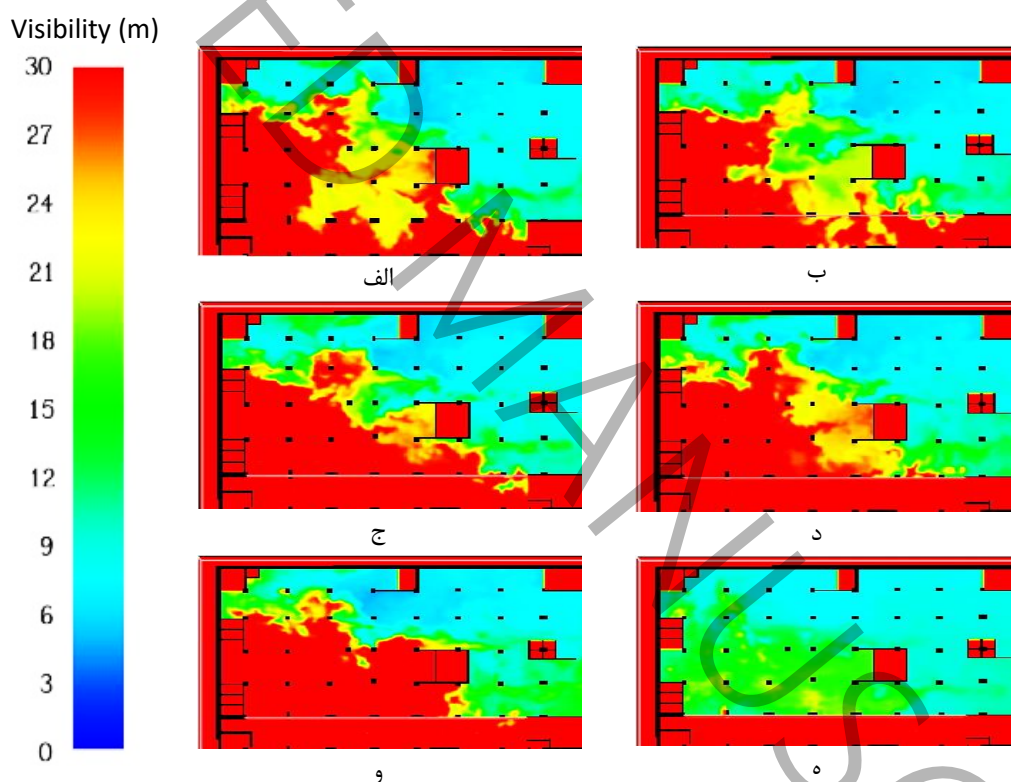


شکل ۶- توزیع دود پارکینگ در زمان، الف) ۴۰، ب) ۱۲۰، ج) ۳۰۰، د) ۶۰۰ ثانیه

Fig. 6. Smoke distribution in the parking at (a) 40 s, (b) 120 s, (c) 300 s, and (d) 600 s.

شکل ۷، توزیع میدان دید را برای شش ارتفاع مختلف پرده دودبند در لحظه ۶۰۰ ثانیه از آغاز شبیه‌سازی نشان می‌دهد. در تمامی حالات، افت میدان دید در ناحیه راست پارکینگ (مجاور دریچه‌های تخلیه دود) نسبت به ناحیه چپ (مجاور دریچه‌های ورود هوای تازه) کاملاً مشهود است. این رفتار ناشی از ساختار جریان جابجایی است که در آن هوای تازه از سمت چپ وارد و دود به سمت دریچه‌های تخلیه هدایت می‌شود؛ در نتیجه غلظت

ذرات دود در ناحیه راست به طور قابل توجهی افزایش یافته و سطح میدان دید، به شدت افت می کند. در حالت (الف)، میدان دید در ناحیه چپ در بازه ۲۷ تا ۳۰ متر، در ناحیه میانی در بازه ۱۲ تا ۱۸ متر، و در ناحیه راست در بازه ۶ تا ۱۲ متر قرار دارد. با تغییر ارتفاع پرده دودبند در حالت های (ب) و (ج)، اگرچه میدان دید ناحیه چپ تقریباً ثابت (۲۷ تا ۳۰ متر) می ماند، این تغییر موجب بهبود ۳۳٪ میدان دید در ناحیه میانی (به بازه ۱۲ تا ۲۴ متر) و همزمان افت ۲۵ تا ۵۰٪ در ناحیه راست (به بازه ۳ تا ۹ متر) می شود. این الگوی غیریکنواخت نشان می دهد که افزایش ارتفاع پرده در این دو حالت، جریان دود را به سمت ناحیه راست متمرکزتر کرده و تعادل توزیع دید را در راستای طولی پارکینگ بر هم می زند. در حالت های (د) و (ه)، میدان دید سمت چپ در محدوده ۲۷ تا ۳۰ متر ثابت می ماند؛ اما در ناحیه راست با بهبودی در حدود ۰ تا ۷۵٪ نسبت به حالت مبنا (الف) تا میزان ۶ تا ۲۱ متر افزایش می یابد که گویای پخش یکنواخت تر لایه دود در این حالت است. در مقابل، در حالت (و) که پرده دودبند کاملاً فضا را بسته است، میدان دید در سمت چپ پارکینگ با کاهش ۴۰ تا ۵۵٪ به بازه ۱۲ تا ۱۸ متر محدود شده و در سمت راست نیز با افت ۲۵٪ به بازه ۶ تا ۹ متر کاهش می یابد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع پرده دودبند از ۰/۵ متر تا ۲ متر فرآیند تخلیه دود و تهویه هوا بهتر انجام می شود، زیرا پرده دودبند اگرچه مانند یک مانع عمل می کند و از گسترش حریق و دود به سایر مناطق جلوگیری می کند، با این وجود سرعت تخلیه دود به مناطق دیگر افزایش می یابد. زیرا افزایش ارتفاع پرده، باعث افزایش فشار جریان در منطقه اصلی و به علت کاهش سطح مقطع خروجی دود سبب افزایش سرعت تخلیه دود می گردد. همچنین از مقایسه حالت ها مشاهده می شود، که حالت (و) با ارتفاع ۲ متر برای پرده دود بند دارای بیش ترین میدان دید، و حالت (ه) در حالت پرده دود بند بصورت کاملاً بسته، کم ترین میدان دید را نسبت به بقیه حالت ها دارد.



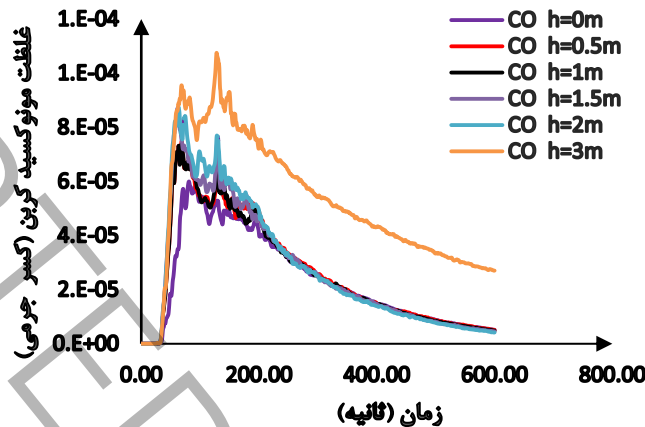
شکل ۷ توزیع میدان دید برای زمان ۶۰۰ ثانیه و برای ارتفاع پرده دودبند مختلف (الف، $h=0$ ، ب، $h=0.5$ ، ج، $h=1$ ، د، $h=1.5$ ، ه، $h=2$ ، و، $h=3$) متر

Fig. 7. Visibility distribution at $t=600$ s for different smoke-curtain heights: (a) $h=0$, (b) $h=0.5$ (c) $h=1$, (d) $h=1.5$, (e) $h=2h$, and (f) $h=3h$

در شکل ۸، روند تغییرات میانگین غلظت مونوکسید کربن در بازه زمانی ۰ تا ۶۰۰ ثانیه و برای ۶ حالت مختلف ارتفاع پرده دودبند در مقطع افقی واقع در ارتفاع ۱/۸ متری نشان می دهد. تحلیل نتایج حاکی از آن است که در فاز اولیه حریق، در بازه زمانی ۰ تا ۱۰۰ ثانیه، غلظت مونوکسید کربن با شیبی تند افزایش می یابد. در این مدت زمان، مقادیر غلظت مونوکسید کربن برای تمام حالات بین 10^{-5} تا 9×10^{-5} متغیر می باشد. با فعال شدن سیستم مدیریت دود (شامل فن های تخلیه، هوای تازه و جت فن ها) در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰ ثانیه، روند صعودی غلظت مونوکسید کربن متوقف شده و در تمامی حالات، کاهش محسوسی در سطح آلاینده ها مشاهده می شود. در ادامه با استمرار جریان هوای تازه و تخلیه موثر محصولات احتراق، روند

کاهش غلظت مونوکسید کربن تداوم می‌یابد.

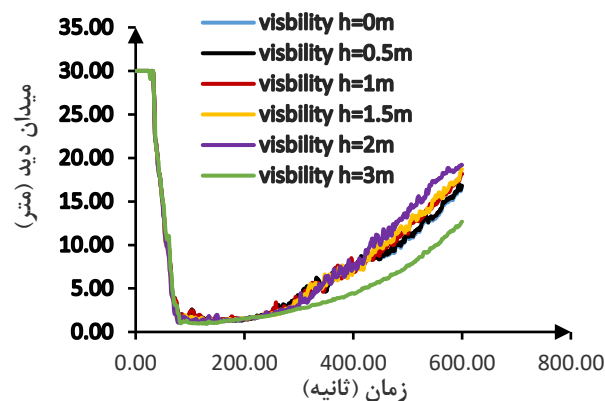
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای ارتفاع ۰ تا ۲ متر برای پرده دود بند، نتایج مشابه می‌باشد؛ به‌طوری که غلظت در این حالات در بازه ۰ تا 5×10^{-5} قرار می‌گیرد. در حالیکه، برای ارتفاع ۳ متر پرده دودبند که پرده دودبند کاملاً بسته است، غلظت مونوکسید کربن را به مراتب بالاتر و در محدوده 3×10^{-5} تا 8×10^{-5} قرار می‌گیرد. این امر حاکی از آن است که بسته شدن کامل پرده‌های دودبند، با ایجاد مانع در برابر جریان‌های عرضی تهویه، باعث تجمع آلاینده‌ها و کاهش کارایی سیستم مدیریت دود می‌شود.



شکل ۸ مقادیر میانگین کسر جرمی مونوکسید کربن به ازای زمان‌های مختلف برای مقطع افقی واقع در ارتفاع ۱/۸ متر

Fig. 8. Average carbon monoxide mass fraction at different times for a horizontal plane at a height of 1.8 m.

شکل ۹، میانگین میدان دید در پارکینگ را در بازه زمانی ۰ تا ۶۰۰ ثانیه برای شش حالت مختلف پرده دودبند، در مقطع افقی واقع در ارتفاع ۱/۸ متری نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که پس از حدود ۱۰۰ ثانیه از آغاز حریق، انتشار دود و افزایش غلظت مونوکسیدکربن در فضا موجب شده است میانگین میدان دید در هر شش حالت پرده دودبند به کمتر از ۳ متر کاهش یابد. سپس در بازه زمانی ۱۰۰ تا ۲۰۰ ثانیه، میانگین میدان دید در تمام حالت‌ها تقریباً در حدود ۲ الی ۳ متر ثابت می‌ماند. زیرا اگرچه در این زمان، سیستم تخلیه دود، ورود هوای تازه و جت فن‌ها فعال شده است اما همچنان حجم دود در پارکینگ زیاد است. در بازه زمانی ۲۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه، به دلیل تخلیه تدریجی دود، میانگین میدان دید در تمام حالت‌ها در این بازه افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود در این بازه زمانی، با افزایش ارتفاع پرده دود بند از ۰ تا ۲ متر، میانگین میدان دید افزایش یافته است. همانطور که گفته شد، افزایش طول پرده دودبند تا ارتفاع ۲ متر، باعث ایجاد یک لایه فشار مثبت شده که در افزایش سرعت تخلیه دود از پارکینگ تاثیر مستقیم دارد، بنابراین در حالت $h=2$ متر به علت ایجاد فشار مثبت قوی‌تر نسبت به سایر حالت‌ها، دود با سرعت بیش تری از پارکینگ تخلیه شده و دارای میانگین میدان دید بیشتری می‌باشد. در این حالت میدان دید تقریباً ۱۲٪ نسبت به حالت بدون پرده دودبند و ۴۶٪ نسبت به حالت پرده کاملاً بسته بیشتر می‌باشد. در حالت $h=3$ متر، به علت بسته بودن کامل پرده دودبند و تراکم بالای دود در این حالت و بسته بودن راه خروج دود به منطقه دوم، کم‌ترین میدان دید نسبت به بقیه حالت‌ها مشاهده می‌شود.



شکل مقادیر میانگین میدان دید به ازای زمان‌های مختلف برای مقطع افقی واقع در ارتفاع ۱/۸ متر

Fig. 9. Average visibility values at different times for a horizontal plane at a height of 1.8 m.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر ارتفاع پرده دودبند بر تغییرات میدان دید و غلظت مونوکسید کربن با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار پاپروسیم ۲۰۲۴ در یک پارکینگ مجتمع تجاری بررسی شد. در این مطالعه شش حالت مختلف پرده دودبند با تمرکز بر میدان دید و غلظت مونوکسید کربن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی بصورت خلاصه شامل موارد زیر است:

- افزایش ارتفاع پرده دودبند تا یک مقدار بهینه (در این مطالعه تا ۲ متر)، با کاهش سطح مقطع خروجی و ایجاد لایه فشار مثبت، منجر به افزایش سرعت تخلیه دود از پارکینگ و در نتیجه بهبود میدان دید گردید.
- با افزایش ارتفاع پرده دودبند تا ۲ متر، فرآیند تهویه و تخلیه دود بهینه‌تر انجام شده و میانگین میدان دید نسبت به حالت بدون پرده حدود ۱۲٪ و نسبت به حالت پرده کاملاً بسته تا ۴۶٪ افزایش می‌یابد.
- بسته شدن کامل پرده دودبند (ارتفاع ۳ متر) به دلیل مسدود کردن جریان‌های عرضی تهویه و ایجاد مانع در مسیر خروج دود به مناطق مجاور، باعث تجمع آلاینده‌ها و کاهش کارایی کل سیستم مدیریت دود می‌شود؛ به همین دلیل، این حالت دارای کمترین میزان میدان دید در مقایسه با سایر حالت‌هاست.
- پس از ۱۰۰ ثانیه از ایجاد حریق، با فعال شدن سیستم مدیریت دود، روند افزایشی غلظت مونوکسید کربن متوقف شده و بطور تدریجی کاهش می‌یابد. در حالت‌های با پرده‌های دود بند با ارتفاع صفر تا ۲ متر، غلظت آلاینده‌ها به مراتب کمتر از حالت پرده دود بند کاملاً بسته است که تاییدکننده نقش کلیدی جریان تهویه عرضی در پاکسازی محیط پارکینگ است.
- بر اساس شاخص‌های میانگین میدان دید و غلظت آلاینده‌ها، پرده دودبند با ارتفاع ۲ متر به‌عنوان حالت بهینه جهت بیشینه‌سازی ایمنی و کارایی تخلیه دود در پارکینگ پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- [1] J. Glasa, L. Valasek, P. Weisenpacher, L. Halada, Cinema fire modelling by FDS, In Journal of Physics: Conference Series, 410(1) (2013).
- [2] X. Long, X. Zhang, B. Lou, Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 40(4) (2017) 1-10.
- [3] M.A.R. Khandoker, R.J. Mou, M.A. Muntaha, M.A. Rahman, Numerical simulation of fire in a multistoried ready-made garments factory using PyroSim, in: In AIP conference proceedings 2018.

- [4] M. Xu, D. Peng, Pyrosim-based numerical simulation of fire safety and evacuation behaviour of college buildings, *International Journal of Safety and Security Engineering*, 10(2) (2020) 293–299.
- [5] Z. Zhang, H.S. Kong, A study on the fire safety of high-rise apartments based on fire door switch and automatic fire extinguishing system, *International Journal of Advanced Culture Technology*, 9(4) (2021) 424–430.
- [6] N. Wang, Y. Gao, C.Y. Li, W.M. Gai, Integrated agent-based simulation and evacuation risk-assessment model for underground building fire: A case study, *Journal of Building Engineering*, 40 (2021) 102609.
- [7] L. Liao, H. Li, P. Li, X. Bao, C. Hong, D. Wang, P. Wu, Underground evacuation and smoke flow simulation in Guangzhou international financial city during fire, *Fire*, 6(7) (2023) 266.
- [8] W. Lin, Q. Liu, M. Zhang, B. Cai, H. Wang, J. Chen, Y. Zhou, Numerical simulation on smoke temperature distribution in a large indoor pedestrian street fire, *Fire*, 6(3) (2023) 115.
- [9] L. Bolina, E.G. Fachinelli, E.C. Pachla, F.R. Centeno, A critical analysis of the influence of architecture on the temperature field of RC structures subjected to fire using CFD and FEA models, *Applied Thermal Engineering*, 247 (2024) 123086.
- [10] Q. Zhu, J. Li, Y. Du, Simulation Study of Personnel Evacuation in Fire Scenarios of Old School Buildings, *Journal of System Simulation*, 36(9) (2024) 2043–2053.
- [11] X. Li, R. Chen, Y. Zhu, C.Y. Jim, Emergency fire evacuation simulation of underground commercial street, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 134 (2024) 102929.
- [12] X. Li, C. Wang, M.A. Kassem, K.N. Ali, Emergency evacuation of urban underground commercial street based on BIM approach, *Ain Shams Engineering Journal*, 15(4) (2024) 102633.
- [13] J. Wang, G. Chen, Y. Chen, M. Zhu, J.L. Zheng, N., Simulation of Fire Smoke Diffusion and Personnel Evacuation in Large-Scale Complex Medical Buildings, *Buildings*, 15(8) (2025) 1329.
- [14] L.N. Zhang, X. Zhuang, J. An, H.X. Li, D. Zheng, N. Yu, The effect of sprinkler and smoke barrier facilities on fire evacuation in apartment buildings, *Journal of Building Engineering*, 111 (2025) 113224.
- [15] T. Liu, Y. Chen, J. Li, S. Zeng, F. He, Z. Liu, Failure Cause Analysis of High-Rise Residential Fire Alarms Based on Pyrosim Simulation, In 2025 International Conference on Engineering Management and Safety Engineering (EMSE 2025) (2025).
- [16] R. Gao, A. Li, X. Hao, W. Lei, B. Deng, Prediction of the spread of smoke in a huge transt terminal subway station under six different fire scenarios, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21 (2012) 128–138.

- [17] B. Pan, H. Yao, F. Wang, Analysis on effectiveness of ventilation and smoke exhaust system in certain subway station, *Energies*, 15(2) (2012) 409.
- [18] B. Giachetti, D. Couton, F. Plourde, Smoke spreading analysis from an experimental subway scale model, *Fire Safety Journal*, 86 (2016) 75–82.
- [19] M. Kmecová, M. Krajčík, Straková, Designing jet fan ventilation for an underground car park by CFD simulations, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(1) (2019) 39–43.
- [20] G. Ghassabi, M. Moghaddam, S.S. Noorbakhsh, F. Yeganeh, M. Moghaddam, Numerical Simulation of the Impact of Smoke Management Scenarios on Visibility of a Car Park, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 95(2) (2025) 113–122.
- [21] Fire Dynamics Simulator User's Guide, UL Research Institutes, Fire Safety Research Institute, Columbia, Maryland, 2024.
- [22] ANSYS Fluent Theory Guide, Release 2024 R1, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2024.
- [23] H. Zhang, G. Yan, M. Li, J. Han, Analysis of the indoor fire risk based on the Pyrosim simulation. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 636(1) (2021).

Numerical Investigation of the Effect of Smoke Curtain Height on Visibility Field and Carbon Monoxide Distribution in a Closed Parking Garage Using Pyrosim Software

Ghodrat Ghassabi^a, Seyed Ehsan Shakib^b, Farhad Yegane^c

^a Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

^b Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

^c M.Sc. Student of Mechanical Engineering, Bozorgmehr University of Qaenat, Qaen, Iran

ABSTRACT

Smoke curtains are of particular importance in smoke management within parking garages. In this study, the effect of increasing the smoke curtain height on changes in visibility range and carbon monoxide concentration was investigated for a commercial parking garage using Pyrosim 2024 software, a subject that has not received significant attention in previous studies. The simulation parameters included a 4 MW Heat Release Rate (HRR) and polyurethane as the fuel source, with variations in smoke curtain height considered. The simulation was performed for 10 minutes post-ignition. A numerical investigation was conducted for simulation validation. The results show that in the 2-meter smoke curtain state, visibility in the center and left side of the parking is approximately 27 to 30 meters, and between 6 to 21 meters on the right side. In this state, visibility is approximately 12% higher compared to the no-curtain state and 46% higher compared to the fully closed curtain state. The highest visibility is observed for the 2-meter curtain state, and the lowest visibility is observed for the fully closed curtain state. The results also indicate that in the fully closed curtain state, the maximum carbon monoxide concentration is between 1.5×10^{-5} and 3×10^{-5} .

KEYWORDS

Smoke curtain, Jet fan, Make-up air, Smoke extraction, Fire