

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} .

Review History:

Received: Apr. 25, 2026

Revised: Aug. 16, 2026

Accepted: Aug. 22, 2026

Available Online: Aug. 29, 2026

Keywords:

Smoke Curtain

Jet Fan

Make-Up Air

Smoke Extraction

Fire

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

*Corresponding author's email: ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir



Fig. 1. Geometry and dimensions of the car park.

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.

2- 3- Fire Scenario and Boundary Conditions

Arealistic vehicle fire scenario was simulated, representing the combustion of a vehicle containing polyurethane. The fire is initiated at $t=1$ s and expands rapidly. The Heat Release Rate (HRR) follows a growth curve that reaches a peak of 4 MW at $t=30$ s, simulating the intense thermal release of polyurethane. At $t=60$ s, 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 m^3/h , followed by the fresh-air supply at $t=90$ s with 42,500 m^3/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.

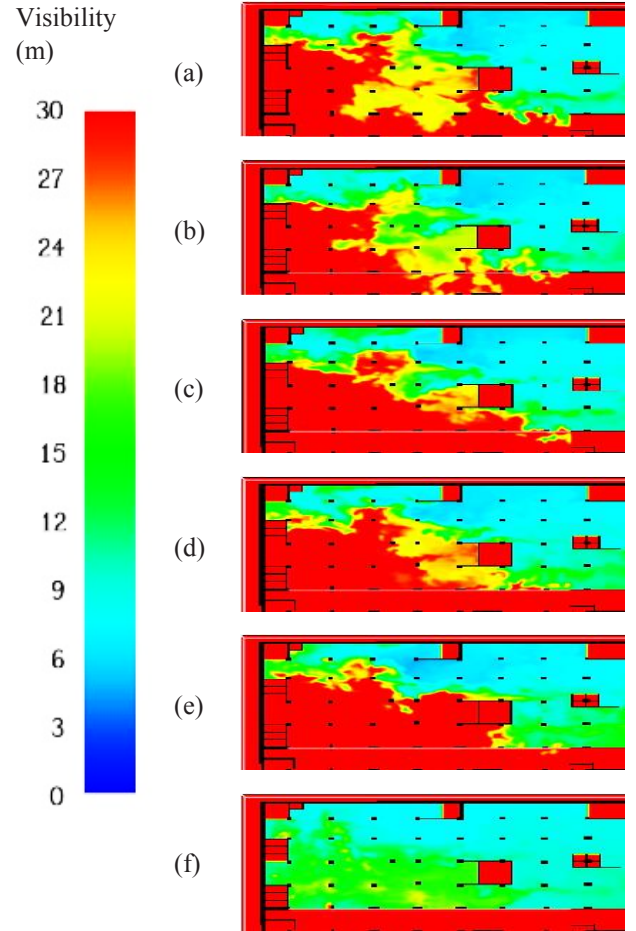


Fig. 2. Visibility distribution at $t=600$ s for different smoke-curtain heights: (a) $h=0$, (b) $h=0.5$ (c) $h=1$, (d) $h=1.5$, (e) $h=2h$, and (f) $h=3h$.

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.

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

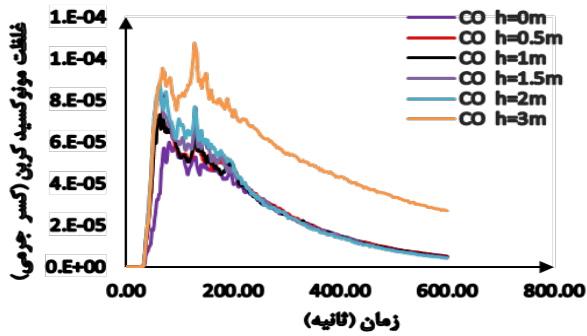


Fig. 3. Average carbon monoxide mass fraction at different times for a horizontal plane at a height of 1.8 m.

results demonstrate that complete closure of smoke curtains hinders transverse air movement, thereby compromising the efficiency of the smoke management system.

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:

Increasing curtain height up to 2.0 m boosts smoke extraction velocity by reducing the exit area and creating a positive pressure effect.

The 2.0m curtain configuration improves average visibility by 12% over the no-curtain case and by 46% over the fully closed case.

References

- [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. Krajčák, 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

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قائن، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

کلمات کلیدی:

پرده دود بند
جت فن
هوای تازه
تخلیه دود
حریق

خلاصه: 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 $1/5 \times 10^{-5}$ تا 3×10^{-5} می‌باشد.

۱- مقدمه

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. گلاس 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.

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

ژو و پنگ [۴]، یک دانشکده را در نرم افزار پایروسیم شبیه سازی کردند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که دود در راه پله های 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 راه پله ۳ در طبقه دوم در ۱۲۳ ثانیه به ارتفاع بحرانی رسیده و راه پله را غیر قابل عبور کرده است. در میان چهار خروجی تخلیه، خروجی ۱ بیشترین آسیب را از آتش سوزی نشان می دهد و از ثانیه ۸۶ غیر قابل عبور می شود. به جز کلاس درس مربوط به آتش سوزی، سایر خروجی ها و راه پله های طبقه اول تحت تأثیر قرار گرفتند. ژانگ و همکارانش [۵]، با مطالعه ایمنی آتش سوزی ساختمان های مسکونی مرتفع دریافتند که بستن راهروی آتش نشانی می تواند سرعت انتشار دود را به طور مستقیم از طریق راهرو به سمت بالا کاهش دهد، اما امکان ورود دود به راه پله را فراهم می کند. وانگ و همکارانش [۶]، با شبیه سازی یک مرکز خرید زیرزمینی در پایروسیم دریافتند که تعداد افرادی که می خواهند 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 به طور قابل توجهی بیش تر از زمان خروج ایمن است. لیائو و همکاران [۷]، شهر زیرزمینی گوانگژو را با استفاده از نرم افزار پایروسیم و پس فاینر شبیه سازی کردند، نتایج شبیه سازی در نرم افزار پایروسیم نشان داد که با شروع آتش سوزی در منطقه اول، زمان تخلیه ایمن و در دسترس برای مردم ۵۳۰ ثانیه است که تمام امکانات آتش نشانی غیر فعال می شوند. نتایج شبیه سازی در نرم افزار پس فاینر نشان داد که زمان تخلیه افراد از منطقه دو، ۱۴۳ ثانیه طول می کشد که با توجه به زمان تخلیه ایمن (۵۳۰ ثانیه) مناسب می باشد. لین و همکاران [۸]، به شبیه سازی عددی توزیع دمای دود در آتش سوزی 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 آتش سوزی افزایش می یابد و ضخامت لایه دود پایدار نیز افزایش می یابد. هنگامی که سیستم خروجی دود فعال می شود، حجم دود به سرعت کاهش می یابد، ضخامت لایه دود کاهش و میزان دید افزایش می یابد. هر چه میزان انتشار حرارت منبع آتش بیشتر باشد، میانگین دمای دود بالاتر می رود. هنگامی که سیستم خروج دود روشن می شود، دمای دود کاهش و مرحله تثبیت دمای دود کوتاه می شود. بولینا و همکاران [۹]، یک تحلیل عددی از ساختمان هایی با ارتفاع سقف متغیر تحت سناریوهای مختلف آتش سوزی در پایروسیم با قرار دادن مشعل ها در گوشه های 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 می شود و دود حاصل از احتراق به سمت بالا پخش می شود. ژو و همکارانش [۱۰]، به طور مشترک یک مدل تخلیه آتش ساختمان های مدارس قدیمی را با استفاده از پایروسیم و پت فاینر شبیه سازی کردند. مطالعه موردی نشان می دهد که بازده تخلیه ساختمان قدیمی مدرسه بدون آب پاش تا ۱۲/۱ درصد کاهش می یابد و تخلیه افراد در وضعیت خطرناک بدون تخلیه دود مکانیکی است که داشتن خروجی های بیشتر تأثیر کمتری بر بهبود کارایی تخلیه افراد دارد. لی و همکارانش [۱۱ و ۱۲]، به شبیه سازی تخلیه اضطراری خیابان های تجاری زیرزمینی با استفاده از پایروسیم و پت فاینر پرداختند. سناریوهای مختلف آتش سوزی در چهار منطقه حفاظت شده از آتش سوزی و نامطلوب ترین منابع آتش سوزی در این مدل تنظیم شدند. براساس تعداد محاسبه شده افراد در شروع آتش سوزی، مسیرهای حرکتی مختلف، پیکربندی پله ها و عرض خروجی شبیه سازی شدند. انتخاب مسیرهای فرار و مکان های ازدحام توسط تصاویر گرافیکی برنامه های شبیه سازی 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 فاینر محاسبه شدند. اثرات سه شکل پله فرار بر استفاده از فرار و نرخ تخلیه مورد ارزیابی قرار گرفت و بازده تخلیه آن ها رتبه بندی شدند. نتایج نشان داد که بازده پله معمولی بیشتر از راه پله مستقیم، و راه پله مستقیم بیشتر از راه پله موازی-دو طرفه است. وانگ و همکاران [۱۳]، به شبیه سازی تخلیه دود آتش و تخلیه پرسنل در ساختمان های پزشکی در مقیاس بزرگ پرداختند. در این مطالعه از ترکیب پایروسیم و پت فاینر و تخلیه پرسنل و گروه های 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 می یابد و افزودن نردبان های آتش نشانی خارجی یک تخلیه هماهنگ چند کاناله را تشکیل می دهد و زمان تخلیه کل را از ۱۷۸۰ ثانیه به ۱۲۶۶ ثانیه کاهش می دهد. ژانگ و همکاران [۱۴]، تأثیر تاسیسات آب پاش و مانع دود بر تخلیه آتش در ساختمان های آپارتمانی را در نرم افزار پایروسیم بررسی کردند، نتایج نشان می دهد که آب پاش ها به تنهایی زمان خروج ایمن موجود را از ۹۲ ثانیه به ۱۵۴ ثانیه افزایش می دهند، در حالی که موانع دود آن را به ۱۱۵ ثانیه افزایش می دهند. استفاده ترکیبی از آب پاش ها و موانع دود ۶۰ سانتی متری با فاصله ۵ متر، به زمان خروج ایمن ۴۲۰ ثانیه دست می یابد. لیو و همکاران [۱۵]، به تجزیه و تحلیل علت آتش سوزی های شدید مسکونی با استفاده از شبیه سازی 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.

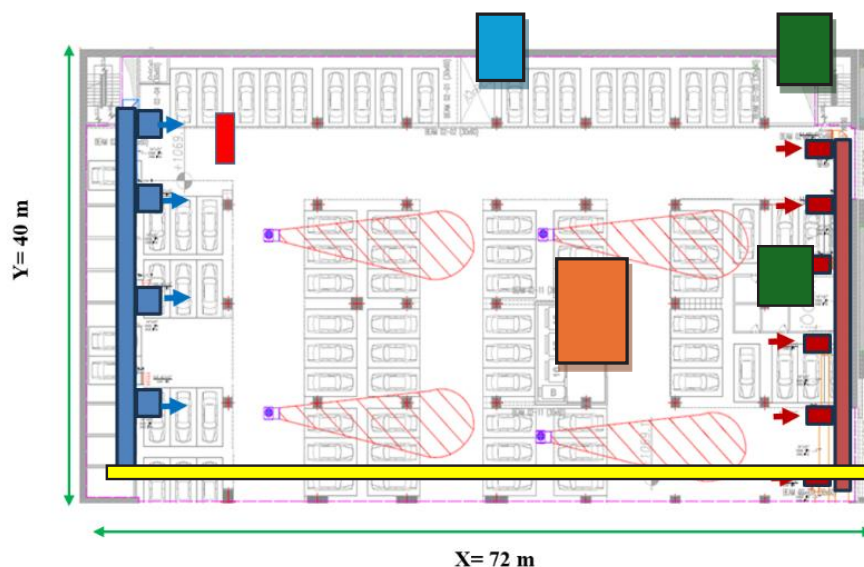
گئو و همکاران [۱۶]، به شبیه‌سازی یک ایستگاه مترو و بررسی گسترش دود با استفاده از تهویه مکانیکی و طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که تهویه مکانیکی مانع گسترش دود در راستای عمودی می‌شود اما در راستای افقی تأثیر کمی دارد. پن و همکاران [۱۷]، با مطالعه روش‌های موثر خروجی دود در ایستگاه‌های مترو و انتخاب مکان‌های 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. قصابی و همکاران [۲۰]، به شبیه‌سازی عددی تأثیر 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 تأخیر 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



شکل ۱. هندسه و ابعاد پارکینگ.

Fig. 1. Geometry and dimensions of the car park.

۳- مدل سازی عددی

در نرم افزار پایروسیم که رابط گرافیکی نرم افزار شبیه ساز دینامیکی حریق^۱ است، جریان دود، انتقال حرارت، احتراق و انتشار گازها با معادلات بقای جرم، ممتوم، 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)

مکعب در ساعت (شامل ۶ دریچه با ابعاد 1×0.35 متر) به منظور پاکسازی هوای پارکینگ و جلوگیری از تجمع دود فعال می شوند و تا پایان تحلیل در ثانیه ۶۰۰ همچنان به مکش ادامه می دهند. در ثانیه ۹۰، که برابر با ۳۰ ثانیه پس از فعال سازی فن های تخلیه دود است، فن های 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 1×0.3 متر) شروع به دمیدن هوای پاک از طریق دریچه های مربوطه می کنند. این فن ها با هدف جایگزینی هوای آلوده پارکینگ تا پایان مدت تحلیل یعنی ثانیه ۶۰۰ فعال است. در نهایت، جت فن های پارکینگ در ثانیه ۱۲۰ فعال می شوند تا جریان هوای قوی را ایجاد کرده و دود و حرارت را به سمت دریچه های تخلیه هدایت کنند. این فن ها همچنین وظیفه توزیع یکنواخت هوای تازه را دارند و فعالیت شان تا پایان ثانیه ۶۰۰ ادامه می یابد تا تهویه کامل پارکینگ تضمین گردد. مطابق ضوابط سازمان آتش نشانی، ظرفیت فن های تخلیه دود برای تعویض ۱۰ بار در ساعت می باشد، ظرفیت فن های هوای تازه نیز ۵۰ درصد فن تخلیه دود می باشد. در این مطالعه، اثر ارتفاع پرده دود بند، برای مقادیر صفر تا ۳ متر بر میدان دید و کسر جرمی متوکسید کربن مورد ارزیابی قرار می گیرد.

1. Fire Dynamics Simulator (FDS)
2. large eddy simulation
3. Mixture Fraction Combustion Model

$$L_s = \min(kd, C_s V^{\frac{1}{3}}) \quad (۶)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \bar{w}) = 0 \quad (۱)$$

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

معادله مومنتوم در جهت X

معادله بقای انرژی

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x}(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \overline{u'T'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \overline{v'T'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \overline{w'T'}) + q_r \end{aligned} \quad (۷)$$

معادله مومنتوم در جهت Y

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

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \overline{u'v'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \rho \overline{v'^2}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \overline{v'w'}) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{w}_i \quad (۸)$$

معادله مومنتوم در جهت Z

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]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \overline{u'w'}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \overline{v'w'}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \rho \overline{w'^2}) \end{aligned} \quad (۴)$$

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 مومنتوم با استفاده از مدل گردابه‌های بزرگ، ویسکوزیته گردابه‌ای توسط معادله زیر تعیین می‌شود [۲۲]:

$$I = I_0 e^{-\sigma L} \quad (۹)$$

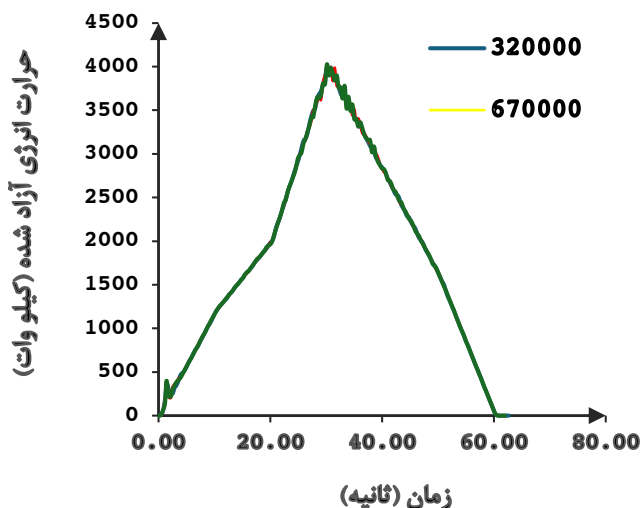
$$\mu_t = \rho L_s^2 |S| \quad (۵)$$

$$S = \frac{-\ln(\tau^*)}{\sigma}$$

در معادله (۵)، S تانسور نرخ کرنش است و L_s طول اختلاط است که

در معادله (۹)، I_0 شدت اولیه نور و I شدت نور پس از عبور از دود است

از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲]:



شکل ۲. نمودار استقلال از شبکه.

Fig. 2. Grid independence plot.

تعداد شبکه محاسباتی با توجه به محدوده مناسب برای اندازه سلول شبکه بین ۱۰/۴۴ تا ۴۱/۷۴ سانتی متر، بررسی شده است. چهار شبکه محاسباتی با ابعاد سلول‌های ۲۶، ۲۰، ۱۶ و ۱۴ سانتی متری، 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 ۳۲۰۰۰۰، 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)

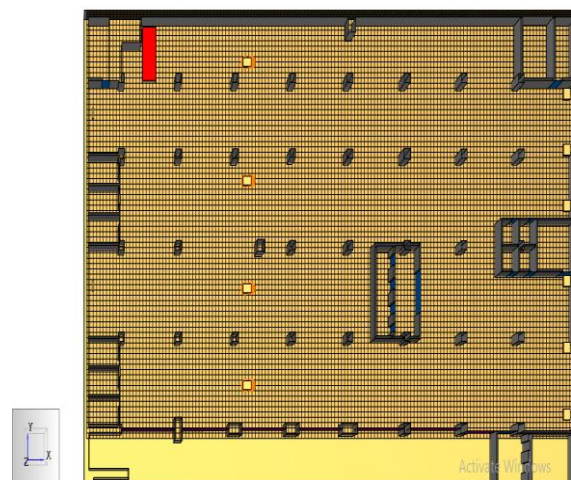
که واحد هر دو وات بر متر مربع می‌باشد. L طول مسیر نور (متر)، σ ضریب خاموشی دود (بر متر)، K ضریب خاموشی جرمی (متر مربع بر کیلوگرم)، ρ چگالی گاز (کیلوگرم بر متر مکعب) و Y کسر جرمی دود است. با ترکیب روابط پیشین، میدان دید S بر حسب متر به‌دست می‌آید. نسبت I به I_0 با τ^* بیان می‌شود که نشان‌دهنده شفافیت 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 $C_p = 1005 \text{ kJ/kg.K}$ ، دمای محیط 273 K 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 سانتی متر به‌دست می‌آید [۲۱]. در ادامه، استقلال نتایج از

فن‌ها فعال نمی‌باشد و جریان دود تنها در اثر جابجایی طبیعی ناشی از حریق در پارکینگ گسترش می‌یابد و بیش‌ترین سرعت دود بین $2/5$ تا $3/5$ متر بر ثانیه می‌باشد. در حالت (ب) سرعت جریان دود را در زمان ۶۵ ثانیه نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در این حالت، در ناحیه ایجاد حریق، سرعت کاهش قابل توجهی یافته است. همچنین به دلیل اینکه، فن‌های تخلیه فعال شده است، سرعت جریان ورودی به فن‌های تخلیه دود که در سمت راست پارکینگ قرار گرفته‌اند، افزایش یافته و حدوداً $2/5$ متر بر ثانیه می‌باشد. در این حالت، در نزدیکی پرده دود بند نیز به دلیل کاهش سطح مقطع خروجی یک جریان با سرعت $2/5$ متر بر ثانیه ایجاد شده است. در حالت (ج) سرعت جریان در زمان ۱۲۵ ثانیه نشان داده شده است. مشاهده گردید که جت فن‌ها فعال شده و سرعت جریان خروجی از جت فن‌ها بین $4/5$ تا ۵ متر بر ثانیه می‌باشد. در حالت (د) سرعت جریان را در زمان ۱۸۵ ثانیه نشان می‌دهد، مشاهده گردید در این حالت فن‌های هوای تازه وارد مدار شده و سرعت جریان خروجی از فن‌های هوای تازه که در سمت چپ پارکینگ قرار دارند، حدوداً $1/5$ متر بر ثانیه می‌باشد. در این حالت، فعال‌سازی فن‌های هوای تازه سبب بهبود خروج جریان در جت فن‌ها گردیده است. همچنین در این حالت، مشاهده می‌شود، فعال شدن جت فن‌های نزدیک دریچه‌های تخلیه

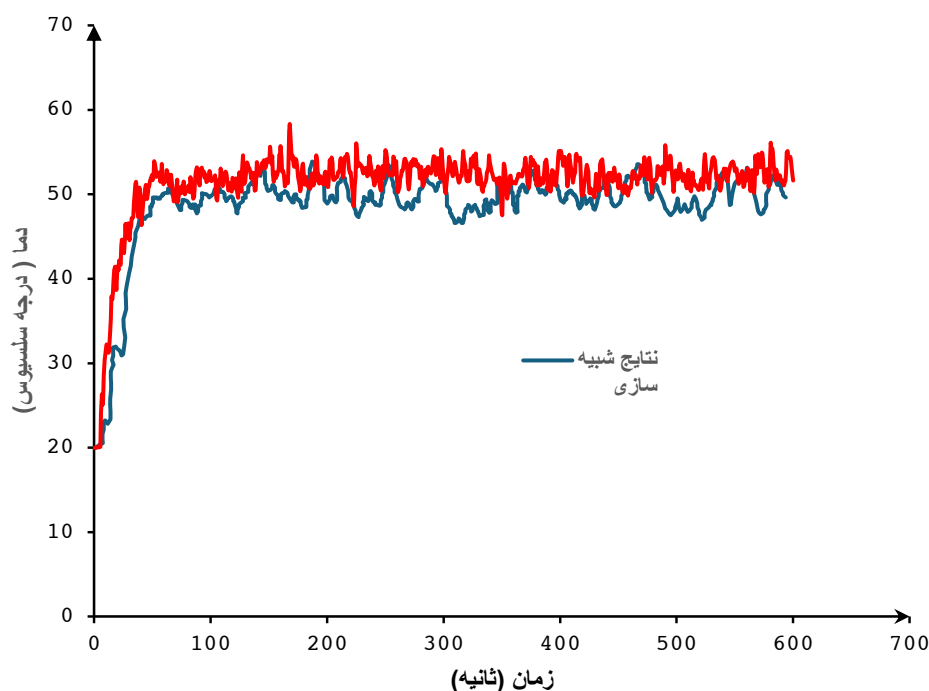


شکل ۳. شبکه‌بندی پارکینگ.

Fig. 3. Computational mesh of the parking.

۴- نتایج

در شکل ۵ سناریو دود و نحوه و زمان فعال‌سازی فن‌های هوای تازه، فن‌های تخلیه دود و جت فن‌ها بیان شده است. حالت (الف) سرعت جریان حریق و دود را در زمان ۵۰ ثانیه نشان می‌دهد. در این حالت هیچ‌کدام از



شکل ۴. مقایسه نتایج شبیه سازی و مرجع ۲۳.

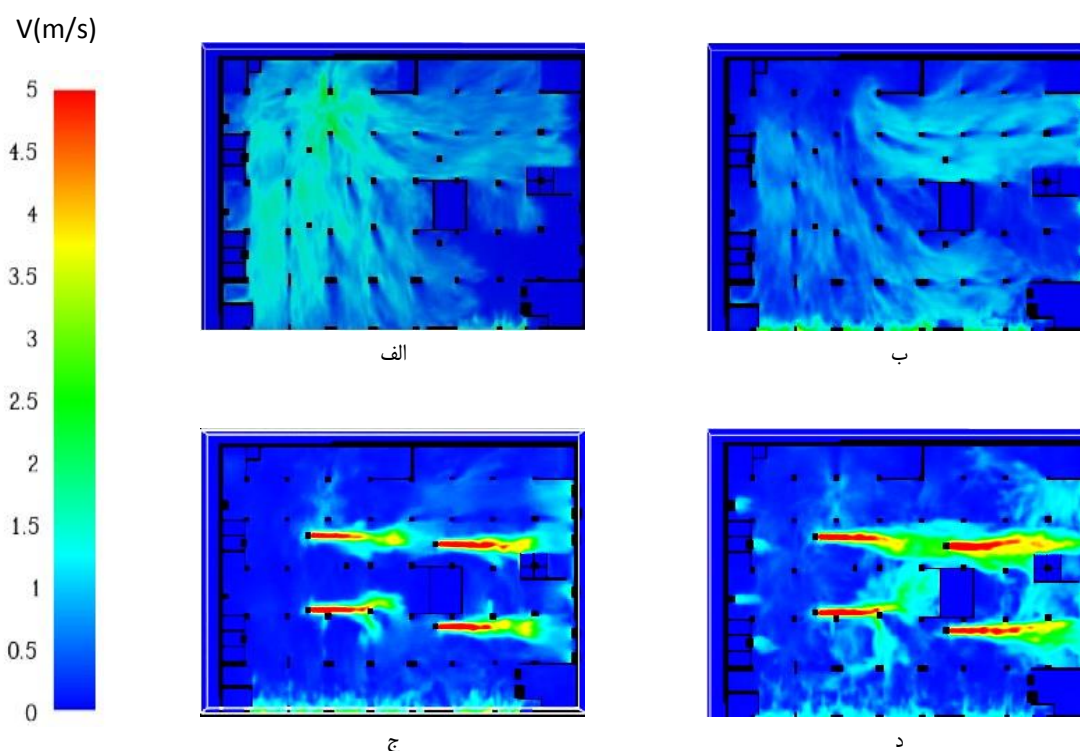
Fig. 4. Comparison of the simulation results with reference [23]

از حریق می‌گذرد، 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 می‌دهد.

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 به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و سطح میدان دید، به‌شدت افت می‌کند. 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 حالت‌های (ب) و (ج)، اگرچه میدان دید ناحیه چپ تقریباً ثابت (۲۷ تا ۳۰ متر) می‌ماند، این تغییر موجب بهبود ۳۳٪ میدان دید در ناحیه میانی (به بازه ۱۲ تا ۲۴ متر) و همزمان افت ۲۵ تا

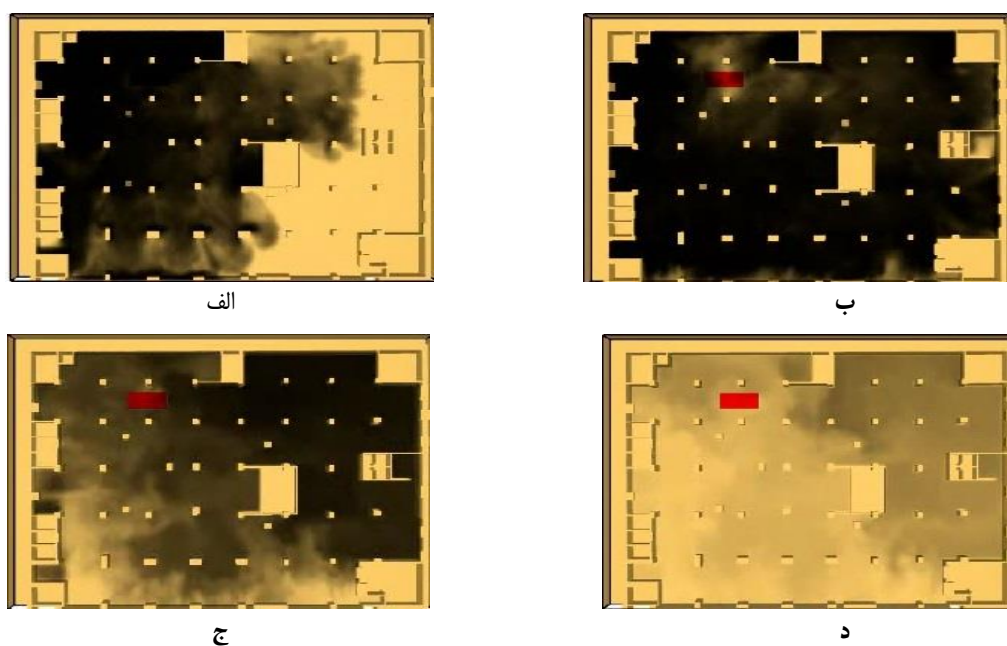
سبب می‌شود سرعت جریان ورودی به دریچه‌های تخلیه تا ۳ متر بر ثانیه افزایش یابد.

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 می‌شود 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 می‌گذرد، با فعال شدن فن‌های تخلیه دود و جت فن‌ها، دود به سمت فن‌های تخلیه جریان یافته و به صورت نسبتاً یکنواخت در تمامی فضای پارکینگ توزیع می‌گردد. مطابق شکل در حالت (ج)، که ۳۰۰ ثانیه از شروع حریق می‌گذرد، در این زمان، از فعال شدن فن‌های هوای تازه نیز ۱۲۰ ثانیه گذشته است و ورود هوای تازه، منجر به تغییر الگوی توزیع دود می‌گردد؛ به گونه‌ای که دود به تدریج از سمت چپ به سمت راست هدایت شده و غلظت آن در ناحیه منبع حریق کاهش می‌یابد. در حالت (د) که ۶۰۰ ثانیه



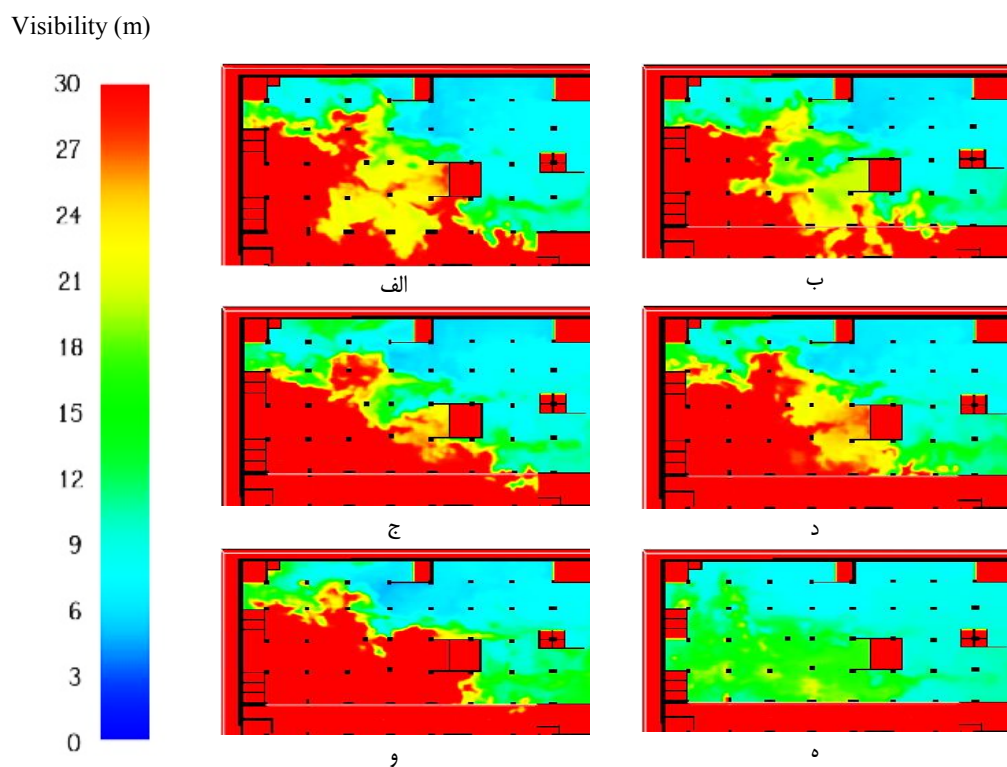
شکل ۵. توزیع سرعت هوا در پارکینگ در زمان، (الف) ۵۰، (ب) ۶۵، (ج) ۱۲۵، (د) ۱۸۵، ثانیه.

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.



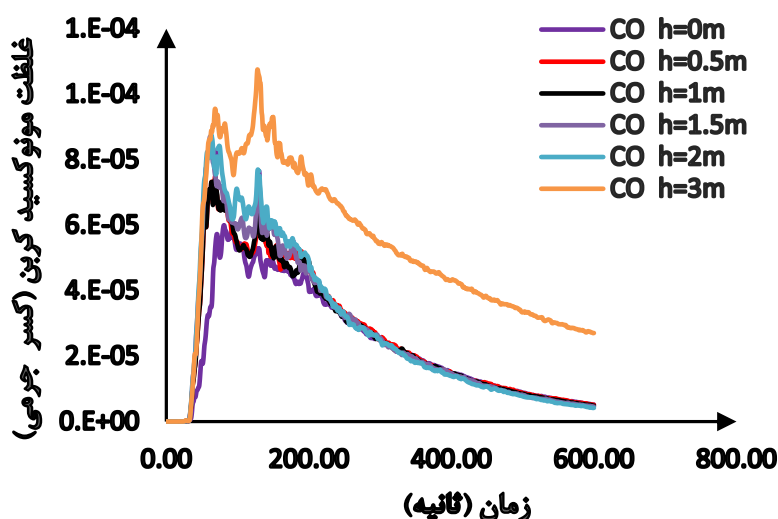
شکل ۷. توزیع میدان دید برای زمان ۶۰۰ ثانیه و برای ارتفاع پرده دودبند مختلف (h)، (الف) $h=0$ ، (ب) $h=0.5$ ، (ج) $h=1$ ، (د) $h=1.5$ ، (ه) $h=2$ ، (و) $h=3$ متر

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 می‌دهد. 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 می‌یابد. در این مدت زمان، مقادیر غلظت مونوکسید کربن برای تمام حالات بین $10^{-5} \times 6$ تا $10^{-5} \times 9$ متغیر می‌باشد. با فعال شدن سیستم مدیریت دود (شامل فن‌های تخلیه، هوای تازه و جت‌فن‌ها) در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰ ثانیه، روند صعودی غلظت مونوکسید کربن متوقف شده و در تمامی حالات، کاهش محسوسی در سطح آلاینده‌ها مشاهده می‌شود. در ادامه با استمرار جریان هوای تازه و تخلیه موثر محصولات احتراق، روند کاهش غلظت مونوکسید کربن تداوم می‌یابد.

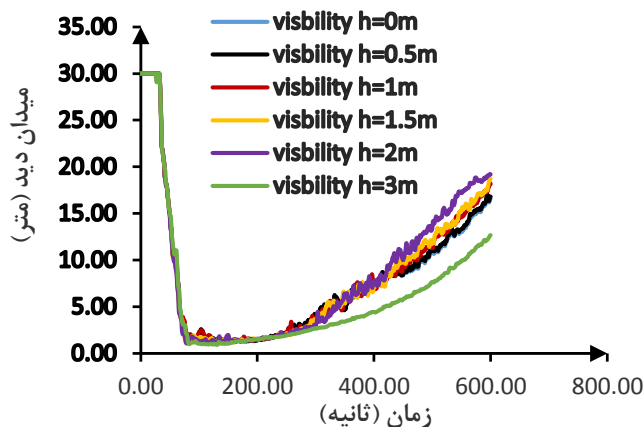
مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای ارتفاع ۰ تا ۲ متر برای پرده دود بند، نتایج مشابه می‌باشد؛ به طوری که غلظت در این حالات در بازه ۰ تا $10^{-5} \times 5$ قرار می‌گیرد. در حالیکه، برای ارتفاع ۳ متر پرده دودبند که پرده دودبند کاملاً بسته است، غلظت مونوکسید کربن را به مراتب بالاتر و در محدوده $10^{-5} \times 3$ تا $10^{-5} \times 8$ 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.

۵۰٪ در ناحیه راست (به بازه ۳ تا ۹ متر) می‌شود. این الگوی غیریکنواخت نشان می‌دهد 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 می‌زند. در حالت‌های (د) و (ه)، میدان دید سمت چپ در محدوده ۲۷ تا ۳۰ متر ثابت می‌ماند؛ اما در ناحیه راست با بهبودی در حدود ۰ تا ۷۵٪ نسبت به حالت مبنا (الف) تا میزان ۶ تا ۲۱ متر افزایش می‌یابد که گویای پخش یکنواخت‌تر 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 می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع پرده دودبند از ۰/۵ متر تا ۲ متر فرآیند تخلیه دود و تهویه هوا بهتر انجام می‌شود، زیرا پرده دودبند اگرچه مانند یک مانع عمل می‌کند و از گسترش حریق و دود به سایر مناطق جلوگیری می‌کند، با این وجود سرعت تخلیه دود به مناطق دیگر افزایش می‌یابد. زیرا افزایش ارتفاع پرده، باعث افزایش فشار جریان در منطقه اصلی و به علت کاهش سطح مقطع خروجی دود سبب افزایش سرعت تخلیه دود می‌گردد. همچنین از مقایسه حالت‌ها مشاهده می‌شود، که حالت (و) با ارتفاع ۲ متر برای پرده دود بند دارای بیش‌ترین میدان دید، و حالت (ه) در حالت پرده دود بند بصورت کاملاً بسته، کم‌ترین میدان دید را نسبت به بقیه حالت‌ها دارد.



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. 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.

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 مونوکسیدکربن 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.

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 بیشتری 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.

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 پایروسیم 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

- 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
- [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,

- 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).
- 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,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Gh. Ghassabia, S. E. Shakibb, F. Yegane, Numerical Investigation of the Effect of Smoke Curtain Height on Visibility Field and Carbon Monoxide Distribution in a Closed Parking Garage Using Pyrosim Software , Amirkabir J. Mech Eng., 58(2) (2026) 149-164.

DOI: [10.22060/mej.2026.25696.7962](https://doi.org/10.22060/mej.2026.25696.7962)

