

Numerical Study of the Required Air Volume for Smoke Exhaust in Enclosed Parking Garages Using PyroSim Software

Ghodrat Ghassabi*, Mohammadreza Zangoei Motlagh, Soheila Davoudi Nia

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

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: January 11, 2026

Revised: May 25, 2026

Accepted: June 09, 2026

ePublished: September 03, 2026

ABSTRACT

Fire in underground parking garages poses a serious threat to the safe evacuation of occupants due to the rapid accumulation of smoke; therefore, the proper design of ventilation and smoke exhaust systems is essential for maintaining adequate visibility and facilitating emergency egress. However, the minimum air volume required to ensure sufficient visibility for safe evacuation in accordance with international standards remains subject to different interpretations. In this study, PyroSim software was employed to numerically investigate the required air volume for smoke exhaust from a 4 MW fire scenario with a duration of 5 minutes in four enclosed parking garages with floor areas of 500, 1000, 1500, and 2000 m², and the visibility conditions were analyzed 10 minutes after fire initiation. The results showed that for parking garages with areas of 500 and 1000 m², an air change rate of 25 air changes per hour (ACH) is required to achieve a visibility distance of 10 m after 10 minutes, whereas in larger garages with areas of 1500 and 2000 m², an air change rate of 20 ACH is sufficient to provide this level of visibility throughout the entire parking space, which can be attributed to more uniform airflow distribution and improved smoke dispersion in larger volumes.

Keywords: Fire, Visibility, PyroSim Software, Numerical Simulation, Ventilation and Smoke Exhaust Systems

How to cite this article

Ghasabi Gh, Zangoei Motlagh M.R, Davoudi Nia S, Numerical Study of the Required Air Volume for Smoke Exhaust in Enclosed Parking Garages Using PyroSim Software. Modares Mechanical Engineering; 2026;26(11):841-851.

*Corresponding author's email: Ghodrat.Ghassabi@buqaen.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-3915-1132



Copyright© 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



مطالعه عددی حجم هوای لازم برای تخلیه دود پارکینگ های بسته با استفاده از نرم افزار پایروسیم

قدرت قصابی*^{ID}، محمدرضا زنگویی مطلق، سهیلا داودی نیا

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قاینات، قاین، ایران

چکیده

آتش سوزی در پارکینگ های زیرزمینی به دلیل تجمع سریع دود، خطر جدی برای خروج ایمن افراد ایجاد می کند. از این رو، طراحی مناسب سامانه های تهویه و تخلیه دود برای حفظ میدان دید و تسهیل خروج اضطراری افراد اهمیت زیادی دارد. با این وجود، حداقل حجم هوای لازم برای ایجاد میدان دید مناسب جهت خروج ایمن افراد مطابق با استانداردهای بین المللی دارای تفاسیر گوناگون است. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار پایروسیم، حجم هوای لازم برای تخلیه دود یک حریق ۴ مگاواتی که به مدت ۵ دقیقه فعال است، در چهار پارکینگ بسته با مساحت های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع مورد بررسی عددی قرار گرفت و وضعیت میدان دید پس از ده دقیقه از ایجاد حریق تحلیل گردید. نتایج نشان داد که جهت ایجاد میدان دید ۱۰ متر پس از ۱۰ دقیقه از ایجاد حریق، برای پارکینگ های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمربع، نرخ ۲۵ بار تعویض هوا در ساعت لازم است در حالی که در پارکینگ های بزرگ تر با مساحت های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع، نرخ ۲۰ بار تعویض هوا در ساعت این مقدار میدان دید را در تمام نقاط پارکینگ ایجاد می کند. این تفاوت به دلیل توزیع یکنواخت تر جریان هوا و پراکندگی بهتر دود در فضاهای وسیع تر است.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۱۲

کلیدواژه ها: آتش سوزی، میدان دید، نرم افزار پایروسیم، مطالعه عددی، سامانه های تهویه و تخلیه دود

نحوه ارجاع به این مقاله

قصابی قدرت، زنگویی مطلق محمدرضا، داودی نیا سهیلا، مطالعه عددی حجم هوای لازم برای تخلیه دود پارکینگ های بسته با استفاده از نرم افزار پایروسیم، مهندسی مکانیک مدرس. ۸۵۱-۸۴۱: ۱۴۰۵؛ ۲۶(۱۱)

*پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: ghodrat.ghassabi@buqaen.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده دار مکاتبات: 0000-0003-3915-1132



۱- مقدمه

آتش سوزی از خطرات جدی ساختمان‌ها محسوب می‌شود و دود حاصل از آن، با کاهش میدان دید و ایجاد خفگی در ارتفاع تنفسی، تهدیدی به مراتب خطرناک‌تر از شعله است. در پارکینگ‌های بسته و چندطبقه که تهویه طبیعی ممکن نیست، استفاده از سیستم‌های مکانیکی تهویه و مدیریت دود ضرورت دارد. طبق ضوابط سازمان آتش‌نشانی ایران، ساختمان‌هایی دارای سه طبقه زیرزمین یا بیشتر یا با مساحت بیش از ۵۰۰ متر مربع در هر طبقه، موظف به اجرای دستورالعمل «تهویه، تخلیه و کنترل دود» هستند.

عملکرد این سامانه‌ها با شبیه‌سازی عددی جریان دود در نرم‌افزارهای (Dynamics Simulator Fire) و پایروسیم (PyroSim) بررسی می‌شود. بر اساس استانداردهای بین‌المللی، نرخ ۶ بار تعویض هوا در ساعت برای شرایط عادی و ۱۰ بار در ساعت برای وضعیت آتش‌سوزی پیشنهاد شده است تا میدان دید حداقل ۱۰ متر جهت تخلیه ایمن افراد حفظ شود.

به دلیل اهمیت کنترل دود در ایمنی ساختمان‌ها، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه شبیه‌سازی رفتار دود، تحلیل جریان هوا و بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های تهویه و مدیریت دود در پارکینگ‌ها انجام شده است.

۲- اشاره به مراجع

در سال ۲۰۰۷، ژانگ و همکاران [۱] با استفاده از نرم‌افزار FDS، گسترش آتش و حرکت دود در پارکینگ زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد آتش‌سوزی شامل چهار مرحله است و سیستم تهویه با ورود هوای تازه موجب احتراق مجدد و گسترش سریع‌تر آتش شد. همچنین جریان‌های آشفته دود داغ در افزایش سرعت گسترش آتش نقش مهمی دارند. در سال ۲۰۱۲، دکرز و همکاران [۲] در پژوهشی تجربی با انجام آزمایش‌های آتش‌سوزی در مقیاس واقعی، رفتار دما و عملکرد سیستم کنترل دود در پارکینگ‌های بزرگ و بسته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش نرخ تخلیه دود نسبت به کاهش نرخ حرارت آتش، تأثیر بیشتری در کاهش برگشت دود دارد. همچنین مشخص شد که موقعیت دقیق فن‌های تخلیه در فاصله دور از منبع آتش اهمیت زیادی ندارد، در حالی که الگوی جریان هوا نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی سیستم تهویه ایفا می‌کند. همچنین آنها نتیجه گرفتند که وجود نواحی گردشی موجب تجمع دود و کاهش اثربخشی تخلیه می‌شود و تیرهای عرضی نیز می‌توانند حرکت دود را حتی در شرایط حرارتی بالا محدود کنند. علاوه بر این، فن‌های جت القایی با نیروی پنجاه نیوتن عمده‌تاً موجب خنک‌کنندگی موضعی می‌شوند و برای عملکرد بهتر لازم است در بخش‌هایی بدون تجمع دود نصب گردند. در سال ۲۰۱۳، دکرز و همکاران [۳] با شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی مبتنی بر آزمایش‌های واقعی، عملکرد سیستم تهویه مکانیکی افقی در پارکینگ خودرو را بررسی کردند. نتایج نشان داد

برای آتشی با توان ۴ مگاوات، سرعت تهویه حدود ۱/۱ متر بر ثانیه برای جلوگیری از برگشت دود کافی است، اما در حضور تیرهای سازه‌ای به‌ویژه تیرهای طولی، این سرعت باید افزایش یابد. همچنین افزایش دبی تخلیه در نواحی دارای جریان گردشی تأثیری در بهبود تهویه ندارد. این پژوهش بر ضرورت طراحی دقیق سیستم تهویه در شرایط واقعی تأکید دارد. در سال ۲۰۱۳، جان‌جان و همکاران [۴] با استفاده از شبیه‌سازی FDS، تهویه جانبی دود در تونل‌های دوطبقه بدون جریان طولی هوا را بررسی کردند. نتایج نشان داد مساحت دریچه‌های دود تأثیر کمی بر جریان دود و دمای کف دارد. همچنین در نتایج آنها مشاهده شد، استفاده از چهار دریچه در نزدیکی منبع آتش نسبت به استفاده از شش دریچه، تخلیه مؤثرتری ایجاد کرده و از آشفته‌گی لایه دود جلوگیری می‌کند. افزایش فاصله بین دریچه‌ها نیز موجب تأخیر در کاهش میدان دید و افزایش مدت‌زمان ایمنی می‌شود. بر اساس تحلیل‌های عملکردی و اقتصادی این پژوهش، فاصله ۹۰ متر میان دریچه‌ها بهترین عملکرد را دارد. در سال ۲۰۱۹، لو و همکاران [۵]، با مدل آزمایشگاهی مقیاس ۱:۵، اثر نرخ آزادسازی حرارت و سیستم تخلیه دود را در پارکینگ‌های عمودی زیرزمینی بررسی کردند. نتایج نشان داد نرخ آزادسازی حرارت بیشترین تأثیر را بر دما دارد و عملکرد سیستم تهویه را تعیین می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که در حضور سیستم تخلیه دود، دمای سمت مقابل آتش به‌طور قابل‌توجهی کمتر از سمت درگیر حریق بود. همچنین، فعال شدن سیستم موجب افزایش دمای طبقات بالای آتش و تغییر اندک دمای طبقات مقابل شد. در سال ۲۰۲۰، وانگ و همکاران [۶] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، تأثیر ارتفاع سقف بر عملکرد سنسورهای دود را بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع سقف، دمای لایه دود کاهش یافته و در ارتفاع‌های بالاتر از ۱۶ متر به کمتر از ۳۵ درجه سلسیوس می‌رسد. همچنین مشخص گردید، پراکندگی دود موجب تأخیر در فعال شدن سنسورها می‌شود. این مطالعه نشان داد که در ساختمان‌هایی با ارتفاع کمتر از ۸ متر، نصب افقی سنسورها کارایی بهتری نسبت به نصب حالت عمودی دارد. این مطالعه اهمیت ارتفاع سقف را در طراحی و نصب بهینه سنسورهای دود نشان می‌دهد. در سال ۲۰۲۰، لانگ و همکاران [۷] در آزمایش‌های مقیاس کامل ایستگاه مترو، حرکت و کنترل دود را بررسی کردند. نتایج نشان داد تهویه طبیعی موجب افزایش دما و ارتفاع لایه دود می‌شود، اما فعال‌سازی سیستم تخلیه، دمای لایه دود را کاهش و کنترل دود را بهبود می‌بخشد. در سال ۲۰۲۱، وانگ و همکاران [۸] با شبیه‌سازی عددی، جریان دود در دهلیزهای بلند و باریک را بررسی کردند و نشان دادند که برای ارتفاع‌های بالاتر از ۱۰ متر، هندسه مقطع و نسبت مساحت به ارتفاع تأثیر قابل‌توجهی بر سرعت و دمای دود دارند. در سال ۲۰۲۱، کالیانیوتیس و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی CFD، روش‌های کاهش دود در انبار زیرزمینی مدیریت زباله‌های خطرناک را بررسی کردند. نتایج نشان

محیط پارکینگ معادل ۲۵ درجه سلسیوس و فشار اتمسفر ۱ اتمسفر (۱۰۱۳۲۵ پاسکال) فرض شده است. هوا دارای غلظت معمول اکسیژن معادل ۲۱٪ است. ابعاد کانال‌ها بر اساس جداول طراحی کانال، دبی مورد نیاز و افت فشار مجاز برابر با ۰/۱ اینچ ستون آب درصد فوت محاسبه گردید و سپس جانمایی دریچه‌ها در پلان پارکینگ انجام شد. این آرایش به گونه‌ای انتخاب شده است که ضمن تأمین جریان هوای لازم، از ایجاد نواحی رکود جلوگیری کرده و شرایط مناسب‌تری برای کنترل و هدایت دود در فضای پارکینگ فراهم کند. حداکثر سرعت مجاز در دهانه دریچه‌ها ۲۵۰۰ فوت بر ثانیه لحاظ شده است. سامانه تهویه و مدیریت دود مورد بررسی شامل ۴ دریچه تأمین هوای تازه با شرط مرزی جریان ورودی و ۴ دریچه تخلیه هوا با شرط مرزی جریان خروجی در پایروسیم است. - بر اساس دستورالعمل‌های سازمان آتش‌نشانی، عملکرد سامانه‌ی کنترل دود در زمان وقوع حریق به صورت مرحله‌ای و زمان‌بندی شده طراحی شده است. در این فرآیند، فن‌های تخلیه‌ی دود برای خارج کردن دود و هوای آلوده از پارکینگ پس از ۶۰ ثانیه وارد مدار می‌گردند. سپس در ثانیه‌ی ۹۰، فن‌های تأمین هوای تازه با هدف تزریق اکسیژن و کاهش غلظت دود فعال می‌شوند. بر اساس مقررات سازمان آتش‌نشانی، ۵۰ درصد نرخ تخلیه جریان هوای سامانه مدیریت دود برای تأمین هوای تازه در شرایط وقوع آتش‌سوزی تعیین شده است.

- دبی جریان‌های ورودی و خروجی دود بر اساس نرخ تعویض هوا (ACH) و برای سناریوهای مختلف پارکینگ محاسبه شده است. در این مطالعه، مساحت‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع و نرخ‌های تعویض هوا ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ بار در ساعت بررسی شدند. دبی سامانه تهویه بر حسب مترمکعب بر ثانیه و با استفاده از رابطه ACH برای هر حالت محاسبه و به عنوان شرط مرزی در مدل عددی اعمال شد. به دلیل تعدد سناریوها، جزئیات کامل محاسبات در متن اصلی ارائه نشده و نتایج نهایی به صورت خلاصه برای ۱۰ بار تعویض هوا در جدول ۱، درج شده‌اند. که در آن a بیانگر طول پارکینگ و b نشان‌دهنده عرض آن است [۱۳].

- مطابق شکل ۱، سنسورهای سنجش میدان دید و غلظت CO در راستای طولی پارکینگ و با فاصله ۱ متر از یکدیگر لحاظ شده‌اند. در پارکینگ‌های بسته که حریق در مرکز واقع شود، میدان دود تحت تأثیر هم‌زمان دریچه‌های ورودی هوا و دریچه‌های خروجی دود گسترش می‌یابد. از این رو، انتخاب موقعیت سنسورها نقش مستقیم در کیفیت ارزیابی نتایج دارد. در راستای همین موضوع، سنسورها در جهت طولی پارکینگ جانمایی شدند تا مسیر غالب حرکت دود و گرادیان غلظت/دید در امتداد طولی محیط به طور مناسب پوشش داده شود. این طراحی باعث می‌شود که نتایج به جای یک برداشت کلی برای کل فضا، به شرایط مکانی متناظر با مسیر واقعی تخلیه دود نزدیک‌تر باشد. یک ورودی به ابعاد ۳×۶ متر نیز در سمت راست پارکینگ در نظر گرفته شده است. مستطیل

داد استفاده از کانال‌های تهویه غیر فعال می‌تواند دود را کنترل کند و فعال‌سازی به موقع پرده‌های دود، انتشار دود را کاهش داده و زمان فرار را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها در طراحی ایمن‌تر فضاهای زیرزمینی کاربرد دارند. در سال ۲۰۲۱، رازقی و همکاران [۱۰] با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد سیستم‌های تهویه اضطراری شامل پرده هوا و فن تخلیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد با تنظیم مناسب سرعت و دبی این سیستم‌ها، می‌توان پراکندگی گرما و گازهای سمی را کنترل و مسیرهای فرار را ایمن کرد. برای نمونه، آتش ۲۰۰ کیلووات با دبی تخلیه ۲ مترمکعب بر ثانیه و سرعت پرده هوا ۱۸ متر بر ثانیه مهار شد، در حالی که آتش ۵۰۰ کیلووات نیازمند سرعت ۳۰ متر بر ثانیه و زاویه ۳۰ درجه بود. در پژوهش لی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۴، رفتار دود در کانال U شکل به صورت نظری و عددی بررسی شد. نتایج نشان داد حرکت دود بیشتر تحت تأثیر شناوری حرارتی و پایداری حباب‌های هوا است. هندسه کانال، به ویژه عرض آن، بر رفتار حباب و انتقال حرارت اثر می‌گذارد. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود طراحی کانال‌های U شکل در حوزه ایمنی حریق کمک کنند. ژو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۵ با ۵۷ شبیه‌سازی، عملکرد استخراج و لایه‌بندی دود در تونل را بررسی کردند. نتایج نشان داد ترکیب تهویه مکانیکی و تخته، کنترل دود را بهبود می‌دهد. اگر فاصله شفت تا تخته کمتر از ۰/۴ متر باشد، دود بدون برگشت گسترش می‌یابد؛ اما در فاصله بیشتر، برگشت دود رخ می‌دهد. در این پژوهش، معیار بحرانی برگشت دود، مدل پیش‌بینی طول حداکثر گسترش دود و یک شاخص جامع برای ارزیابی کنترل دود ارائه شد. با وجود انجام پژوهش‌های متعدد در زمینه مدیریت دود در پارکینگ‌های بسته و بررسی اثر پارامترهای هندسی بر عملکرد سامانه‌های تهویه، هنوز حداقل حجم هوای لازم برای تأمین میدان دید مناسب و تضمین خروج ایمن افراد بطور مستقل و دقیق مورد توجه قرار نگرفته است. این در حالی است که در استانداردهای بین‌المللی نیز درباره این شاخص، ابهام و تفسیرهای متفاوتی وجود دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از نرم‌افزار پایروسیم، به صورت عددی اثر حجم هوای ورودی/تخلیه بر وضعیت میدان دید پس از وقوع حریق را بررسی کرده و در پی ارائه‌ی مبنایی دقیق‌تر برای تعیین شرایط ایمن تخلیه دود و خروج افراد است.

۳- شبیه سازی و شرایط مرزی

در شکل ۱، نمای دوبعدی شبیه‌سازی شده از پارکینگ مورد مطالعه نمایش داده شده است. در این شکل، ابعاد کلی فضا و محل قرارگیری دریچه‌های هوای تازه (در بخش بالایی شکل، دریچه‌های آبی‌رنگ) و دریچه‌های تخلیه هوا (در بخش پایینی، دریچه‌های نارنجی‌رنگ)، نشان داده شده است. مبنای انتخاب ورودی‌های هوا و خروجی‌های دود در این پارکینگ، دستیابی به توزیع یکنواخت جریان و تخلیه مؤثر دود بوده است. در این شبیه‌سازی، دمای اولیه

قرمز رنگ با ابعاد ۵×۲ متر محل وقوع حریق را با توان حرارتی ۴ مگاوات نشان می‌دهد. فرض شده است که حرارت آزاد شده از آتش‌سوزی، از لحظه اشتعال تا خاموشی کامل، به مدت پنج دقیقه ادامه دارد. مطابق شکل ۲، نرخ آزاد سازی حرارت ناشی از حریق در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه به ازای مقادیر مختلف تعویض هوای تخلیه نشان داده شده است. در بازه زمانی ۰ تا ۱۰۰ ثانیه، حریق به صورت یک تابع خطی افزایش می‌یابد و در زمان ۱۰۰ تا ۲۵۰ ثانیه مقدار آن ثابت و در زمان ۲۵۰ تا ۳۰۰ ثانیه به دلیل اطفاء حریق، حریق کاهش می‌یابد و در ۳۰۰ ثانیه به صفر می‌رسد. ماده‌ی قابل اشتعال نیز پلی‌یورتان با فرمول شیمیایی $C_3H_8N_2O$ در نظر گرفته شده است.

۴- معادلات حاکم و مدل ریاضی

در نرم‌افزار پایروسیم که رابط گرافیکی نرم افزار FDS است، جریان دود، انتقال حرارت، احتراق و انتشار گازها با معادلات بقای جرم، ممنتوم، انرژی و گونه‌های شیمیایی و به روش حجم محدود شبیه‌سازی می‌شوند. مدل‌های توربولانس، تابش حرارتی و معادله بیر-لامبرت نیز برای پیش‌بینی دقیق‌تر میدان دید و رفتار دود به کار می‌روند. معادله پیوستگی (معادله بقای جرم)

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

معادله مومنتوم در جهت X

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{u}}{dt} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \bar{u}^2 \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \bar{u}'\bar{v}' \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \bar{u}'\bar{w}' \right) \end{aligned} \quad (2)$$

معادله مومنتوم در جهت Y

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{v}}{dt} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \rho \bar{u}'\bar{v}' \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \rho \bar{v}^2 \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \rho \bar{v}'\bar{w}' \right) \end{aligned} \quad (3)$$

معادله مومنتوم در جهت Z

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\bar{w}}{dt} = & -\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \rho \bar{u}'\bar{w}' \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \rho \bar{v}'\bar{w}' \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \rho \bar{w}^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

در این معادله، 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.

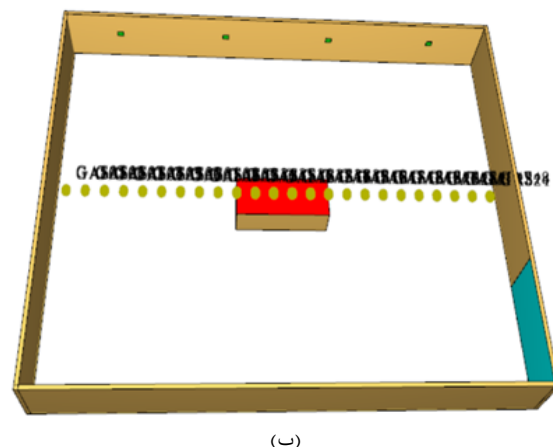
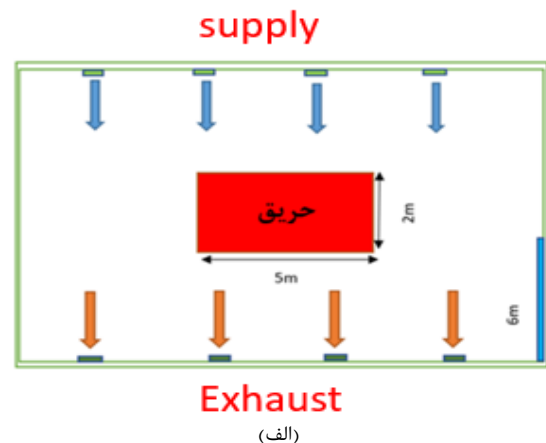
معادله بقای انرژی

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \bar{u}'\bar{T}' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - \bar{v}'\bar{T}' \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} - \bar{w}'\bar{T}' \right) + q_r \end{aligned} \quad (5)$$

جدول ۱ دبی هوای محاسبه شده برای سناریوهای مختلف مساحت پارکینگ و نرخ ۱۰ بار تعویض هوا

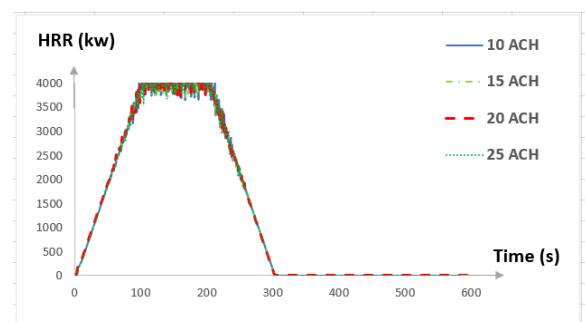
Table 1 Calculated airflow rates for different parking areas and 10ACH scenarios

a (m) × b (m)	Fresh airflow (m ³ /s)	Smoke Extraction Flow (m ³ /s)Rate	Fresh Air Intake Dimensions (m)	Smoke Exhaust Vent Dimensions (m)
25×20	0.5	1.038	0.35 × 0.3	0.66×0.3
50×20	1.04	2.082	0.5×0.35	0.96×0.35
75×20	1.56	3.12	0.6×0.45	0.86×0.5
100×20	2.082	4.16	0.96 × 0.35	1.016×0.55



شکل ۱ (الف) نمای دوبعدی فضای پارکینگ، (ب) نمای شبیه سازی شده در نرم افزار پایروسیم

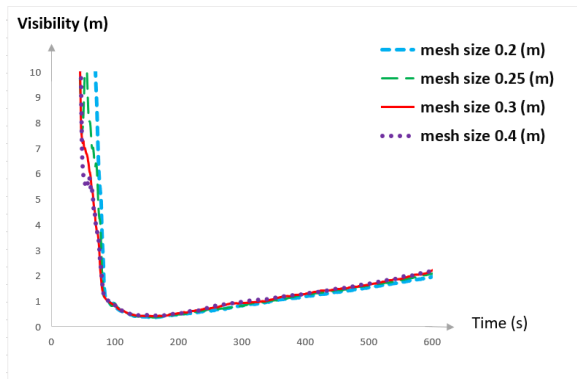
Fig. 1 (a) Three-dimensional view of the parking space, (b) simulated view in the PyroSim software.



شکل ۲ نمودار نرخ آزادسازی حرارت

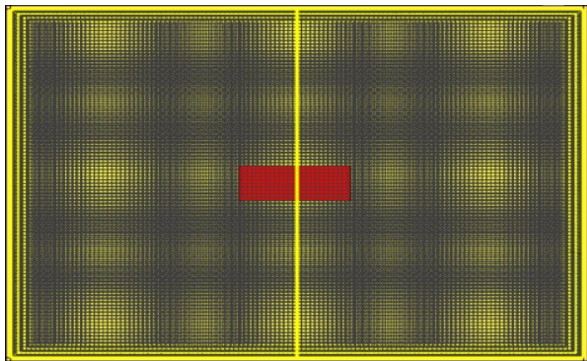
Fig. 2 Heat release rate (HRR) curve.

مقایسه بین نتایج سلول‌های مختلف (۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۴ متر) نیز بیانگر این است که با گذشت زمان تغییری در میدان دید با افزایش و کاهش ابعاد شبکه ایجاد نشده است و اختلاف نتایج بسیار ناچیز است، بصورتیکه حداکثر درصد اختلاف نتایج کمتر از ۵ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده انطباق قابل قبول نتایج میان شبکه‌های مختلف است. بنابراین، اندازه شبکه ۴۰ سانتی‌متر به‌عنوان گزینه‌ای مناسب و بهینه برای این شبیه‌سازی می‌باشد. در این شبیه‌سازی، شبکه محاسباتی شامل ۱۸۲،۲۸۰ سلول است. در شکل ۴، نمای از شبکه بندی پارکینگ نشان داده شده است.



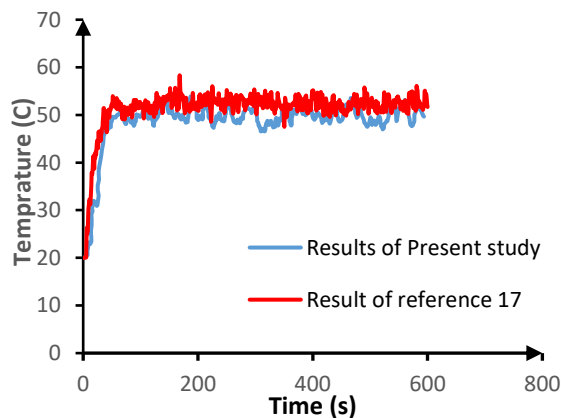
شکل ۳ نمودار استقلال از شبکه محاسباتی

Fig. 3 Grid independence diagram



شکل ۴ نمای از شبکه بندی پارکینگ در نرم افزار پایروسیم

Fig. 4 View of the parking mesh in the PyroSim software



شکل ۵ بررسی اعتبار سنجی نتایج [۱۷]

Fig. 5 Validation of the results [17]

در این معادلات، ρ چگالی هوا، t زمان و u بردار سرعت با مؤلفه‌های u ، v و w در راستاهای x ، y و z هستند. همچنین p فشار، T دما، α ضریب پخش حرارتی و q_r منبع تولید گرما از حریق را نشان می‌دهد [۱۲].

معادله انتقال گونه‌های شیمیایی

(۶)
$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) + \dot{w}_i$$
 این پارامتر نشان‌دهنده نسبت جرم یک گونه شیمیایی به چگالی کل مخلوط سیال در یک نقطه مشخص است. D_i ضریب نفوذ گونه‌ی i و $\dot{w}_i$ نرخ تولید یا مصرف همان گونه بر اثر واکنش شیمیایی است [۱۴].

در نرم‌افزار FDS، میدان دید بر اساس قانون بیرلامبرت محاسبه می‌شود که شدت نور عبوری را تابعی از طول مسیر و ضریب خاموشی دود بیان می‌کند [۱۵].

معادله‌ی کلی قانون بیرلامبرت به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-\sigma L} \\ \sigma &= K_m \rho Y_s \\ S &= \frac{-\ln(\tau^*)}{\sigma} \end{aligned} \quad (7)$$

در این رابطه، 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 به‌دست می‌آید. نسبت I به I_0 با $\tau^* = \frac{I}{I_0}$ بیان می‌شود که نشان‌دهنده شفافیت نسبی محیط یا آستانه دیدپذیری است [۱۵].

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 [۱۵]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (8)$$

در این رابطه، D^* قطر مشخصه آتش (Characteristic Fire Diameter) است برای تعیین اندازه بهینه سلول شبکه، پارامترهای حریق شامل نرخ انتشار حرارت $\dot{Q} = 4 \text{ MW}$ (معادل حریق یک خودرو با سوخت پلی‌بورتان)، چگالی هوا $\rho_{\infty} = 1.204 \text{ kg/m}^3$ ، گرمای ویژه $C_p = 1.005 \text{ J/kg.K}$ ، دمای محیط 273 K و شتاب گرانش $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ در نظر گرفته شد. بر اساس راهنمای FDS، نسبت D^*/dx باید بین ۴ تا ۱۶ باشد که طبق مقادیر فوق، محدوده مناسب سلول شبکه ۱۰/۴۴ تا ۴۱/۷۴ سانتی‌متر به‌دست می‌آید. [۱۶].

با توجه به محدوده مناسب سلول شبکه، در شکل ۳، نتایج میدان دید میانگین چهار شبکه با سلول‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر بررسی شدند. مشاهده می‌شود میدان دید در ابتدای حریق، دارای مقدار ۱۰ متر و سپس به تدریج در طول پارکینگ به کمتر از یک متر کاهش یافته و در بازه زمانی ۱۰۰-۲۵۰ ثانیه تقریباً صفر شده است. پس از ۲۵۰ ثانیه میدان دید به تدریج بهبود یافت اما بسیار کمتر از مقدار اولیه گردید.

۵- بررسی صحت سنجی مدل سازی

مناطق به دلیل تجمع دود می باشد. وجود یک ناحیه مستطیلی شکل (منبع حریق) با رنگ های سبز و زرد (سرعت تقریبی ۱/۵ تا ۲/۷ متر بر ثانیه) در مرکز شکل، تحت تأثیر برهم کنش جریان هوای ورودی از بالا، جریان های ناشی از منبع حریق (که به سمت بالا حرکت می کند) و تلاش سیستم برای تخلیه دود می باشد. این ناحیه نشان دهنده یک منطقه با دینامیک سیالاتی پیچیده تر است که می تواند بر نحوه پراکنده شدن یا متمرکز شدن دود تأثیر بگذارد. تحلیل همزمان کانتور سرعت با کانتورهای میدان دید، به ما امکان می دهد تا تأثیر این الگوهای جریانی بر قابلیت دید در شرایط اضطراری سنجیده می شود. درک دقیق توزیع سرعت و ارتباط آن با محل دریچه ها و منبع حریق، برای بهینه سازی طراحی سیستم های تهویه و تخلیه دود در پارکینگ ها امری ضروری است.

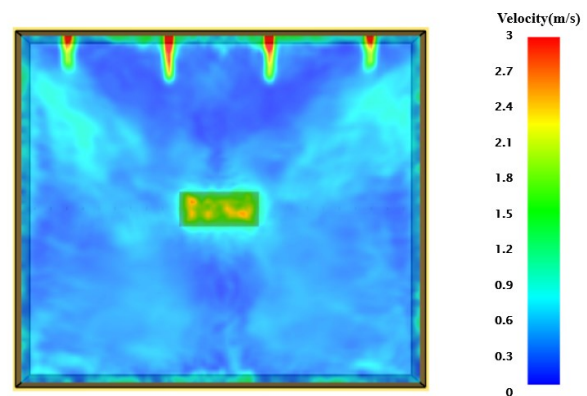
در شکل ۷، وضعیت میدان دید در پارکینگ هایی با مساحت های مختلف و نرخ تعویض هوای ۱۰ بار در ساعت ($ACH=10$) بررسی شده است. در پارکینگ ۵۰۰ مترمربعی، میدان دید کمتر از ۲ متر (به جز نواحی نزدیک دریچه های هوای تازه) گزارش شده است که حاکی از ناکارآمدی سیستم تهویه و شرایط بحرانی برای تخلیه اضطراری است. با افزایش مساحت به ۱۰۰۰ مترمربع، میدان دید به ۲ تا ۳ متر بهبود یافته، اما همچنان پایین تر از حد ایمن قرار دارد. در پارکینگ ۱۵۰۰ مترمربعی، میدان دید در نواحی مرکزی به ۳ تا ۴ متر افزایش یافته و تخلیه دود مؤثرتر شده است، اما در سایر نواحی کمتر از ۳ متر باقی می ماند. پارکینگ ۲۰۰۰ مترمربعی بهترین وضعیت را با میدان دید حدود ۴ متر در نواحی مرکزی نشان می دهد، هرچند این مقدار نیز به حد مطلوب ۱۰ متر نرسیده است. نتیجه گیری کلی برای شکل ۷ این است که افزایش مساحت، علی رغم بهبود نسبی میدان دید، تفاوت چشمگیری در عملکرد کلی ایجاد نمی کند.

در شکل ۸، نتایج مربوط به نرخ تعویض هوای ۱۵ بار در ساعت ($ACH=15$) در پارکینگ هایی با مساحت های مختلف ارائه شده است. در مقایسه با نرخ ۱۰ بار در ساعت، افزایش نرخ تعویض هوا به ۱۵ بار در ساعت، تأثیر قابل توجهی بر بهبود میدان دید دارد؛ به گونه ای که میدان دید از بازه ۲ تا ۳ متر در پارکینگ ۵۰۰ مترمربعی، تا ۶ تا ۸ متر در پارکینگ ۲۰۰۰ مترمربعی افزایش می یابد. این امر بهترین عملکرد سیستم تهویه و شرایط ایمن تر برای فرار اضطراری را فراهم می کند. افزایش مساحت، حجم هوا و دبی تهویه را افزایش داده و میدان دید را بهبود می بخشد. حتی در پارکینگ های کوچک تر، ارتقای نرخ تعویض هوا (نسبت به ۱۰ بار) موجب افزایش میدان دید می شود. با این حال، در هیچ یک از مساحت ها میدان دید به حد مطلوب ۱۰ متر نرسیده است. عملکرد بهتر سیستم تهویه ناشی از حجم هوای تخلیه و ورودی است که به رقیق سازی دود و خروج هوای آلوده کمک کرده و کارایی را در فضاهای بزرگ تر افزایش می دهد (موضوعی که در شکل ۷ نیز منعکس شده بود).

در شکل ۵، برای ارزیابی صحت مدل سازی، نتایج توزیع دمای حاصل از شبیه سازی با داده های مرجع [۱۷] مقایسه گردید. همان طور که مشاهده می شود، نتایج روند حرارتی مشابهی را نشان می دهند؛ به طوری که دما از مقدار اولیه حدود ۲۰ درجه با شیبی تند افزایش یافته و پس از ۵۰ ثانیه در محدوده ۴۵ تا ۵۰ درجه دما تقریباً ثابت می شود. اختلاف میانگین دما در این محدوده، تنها ۱ تا ۲ درجه بوده که بیانگر دقت مناسب شبیه سازی رفتار حرارتی حریق است. این مقایسه کمی و کیفی نشان می دهد نحوه شبیه سازی از اعتبار لازم برخوردار بوده و توانایی پیش بینی شرایط حرارتی در محیط های بسته را دارد.

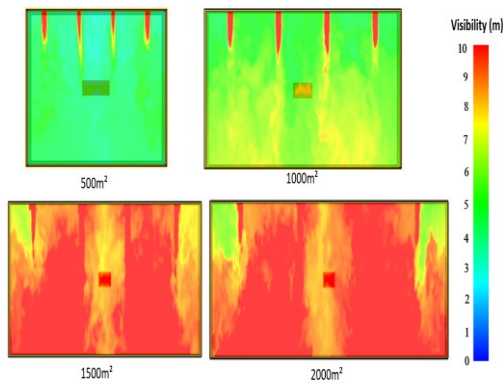
۶- نتایج

برای ارزیابی عملکرد سیستم تهویه در بهبود میدان دید در پارکینگ های بسته، شبیه سازی های عددی با نرم افزار پایروسیم انجام شد. در این شبیه سازی ها، منبع حریق ثابت در نظر گرفته شد تا تأثیر مستقل متغیرهای طراحی بررسی شود. متغیرهای اصلی شامل مساحت پارکینگ و نرخ تعویض هوا در چهار مقدار (۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ بار در ساعت) بودند و تغییرات میدان دید طی ۶۰۰ ثانیه پس از شروع حریق ثبت شد.



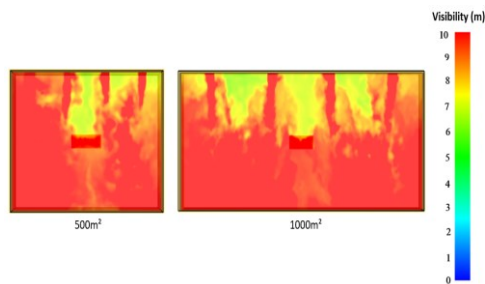
شکل ۶ توزیع سرعت هوا در پارکینگ در حین عملکرد سامانه تهویه
Fig. 6 Air Velocity Distribution in Parking Lot during Ventilation System Operation

به منظور تحلیل کیفی جریان ونحوه انتقال دود، کانتور سرعت جریان در شکل ۶ ارائه شده است. مطابق شکل ۶، نواحی با بالاترین مقادیر سرعت، که با رنگ های قرمز و نارنجی مشخص شده اند، در بالاترین قسمت پارکینگ، نزدیک به دریچه های هوای تازه مشاهده می شوند. این نشان دهنده ورود هوای پرفشار و پرسرعت در زمان فعال شدن دریچه های هوای تازه در زمان ۹۰ ثانیه به داخل پارکینگ است که نقش مؤثری در ایجاد یک لایه هوای پاک در نواحی بالایی و جلوگیری از رسیدن دود به این ناحیه دارد. در مقابل، نواحی با رنگ های آبی و سبز که نشان دهنده سرعت های پایین تر جریان هوا (حدود ۰/۳ تا ۲/۱ متر بر ثانیه) هستند، بخش وسیعی از حجم پارکینگ را پوشش می دهند. سرعت پایین در این



شکل ۹ تکامل میدان دید (۲۰ بار تعویض هوا)

Fig. 9 Evolution of the Field of View (20 Air Changes)



شکل ۱۰ میدان دید نهایی و بهینه (۲۵ بار تعویض هوا)

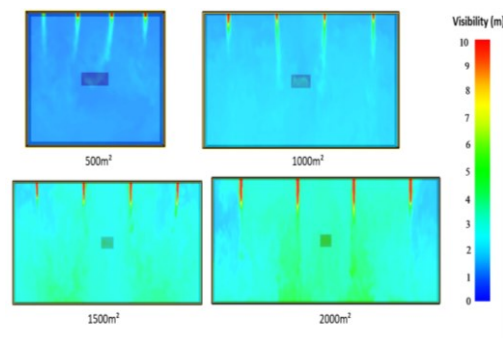
Fig. 10 Final and Optimal Field of View (25 Air Changes)

تقریباً تمام فضا از دید بیش از ۱۰ متر برخوردار است که بیانگر عملکرد بسیار مؤثر سیستم تهویه در مقیاس بزرگتر و توزیع مناسب جریان هوا می‌باشد. به‌طور کلی، افزایش نرخ تعویض هوا از ۱۰ به ۲۰ و ۲۵ بار در ساعت، موجب بهبود چشمگیر شرایط دید ایمنی شده و دستیابی کامل به معیار میدان دید ۱۰ متر را در تمامی سطوح مورد بررسی تضمین می‌کند.

۷- تحلیل نمودارهای میدان دید

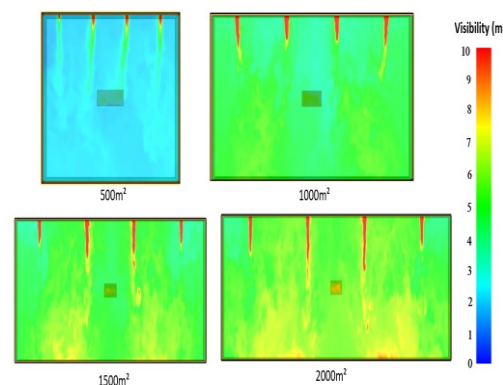
شکل های ۱۰ تا ۱۳، تغییرات میدان دید را در پارکینگ‌هایی با مساحت‌های مختلف (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع) تحت نرخ‌های تعویض هوای ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ بار در ساعت، طی بازه زمانی ۰ تا ۶۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در ابتدای وقوع حریق، میدان دید به دلیل گسترش دود در فضای پارکینگ، در تمامی حالات به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد. این روند کاهشی، پس از حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ ثانیه، با ورود هوای تازه و شروع به کار سیستم تهویه، به‌تدریج معکوس شده و میدان دید بهبود می‌یابد. در نرخ‌های تعویض هوای پایین‌تر (۱۰ و ۱۵ بار در ساعت)، با وجود گذشت زمان ۶۰۰ ثانیه (۱۰ دقیقه)، میدان دید همچنان محدود و عمدتاً در بازه ۱ تا ۵ متر باقی می‌ماند. در مقابل، برای نرخ‌های تعویض هوای بالاتر (۲۰ و ۲۵ بار در ساعت)، میدان دید به‌طور قابل‌توجهی بازایی شده و به آستانه مطلوب ۱۰ متر می‌رسد. این روند در تمامی مساحت‌های مورد بررسی مشهود بوده و نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده نرخ تعویض هوا در بهبود میدان

در شکل ۹، نتایج مربوط به نرخ تعویض هوای ۲۰ بار در ساعت در پارکینگ‌هایی با مساحت‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مساحت از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمربع، میدان دید به‌تدریج بهبود می‌یابد. در مساحت‌های کوچک‌تر (۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمربع)، میدان دید بین ۵ تا ۸ متر متغیر است و وضعیت تهویه نسبتاً مناسب ارزیابی می‌شود. با افزایش مساحت به ۱۵۰۰ مترمربع، میدان دید در بیشتر نواحی به حدود ۱۰ متر می‌رسد و در بزرگ‌ترین مساحت (۲۰۰۰ مترمربع)، تقریباً کل فضا دارای دید مطلوب ۱۰ متر است. این نتایج نشان می‌دهد که در نرخ تعویض هوای ۲۰ بار در ساعت، سیستم تهویه عملکرد بسیار مؤثری در تخلیه دود و ایجاد شرایط ایمن برای خروج اضطراری دارد و برای پارکینگ با مساحت ۱۵۰۰ مترمربع و ۲۰۰۰ مترمربع، نرخ تعویض هوای ۲۰ بار در ساعت حداقل نرخ تعویض هوای مناسب می‌باشد. در شکل ۱۰، نتایج مربوط به نرخ تعویض هوای ۲۵ بار در ساعت برای پارکینگ‌هایی با مساحت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمربع ارائه شده است. در پارکینگ ۵۰۰ مترمربعی، مشاهده می‌شود که بیشتر نواحی دارای میدان دید بین ۹ تا ۱۰ متر است. این امر نشان‌دهنده آن است که سیستم تهویه در این نرخ تعویض هوا، به‌طور قابل‌توجهی توانسته است دود را تخلیه کرده و هوای تازه ورودی، دید مطلوب برای خروج اضطراری را فراهم سازد. در پارکینگ ۱۰۰۰ مترمربعی نیز،



شکل ۷ میدان دید اولیه (۱۰ بار تعویض هوا)

Fig. 7 Initial Field of View (10 Air Changes)



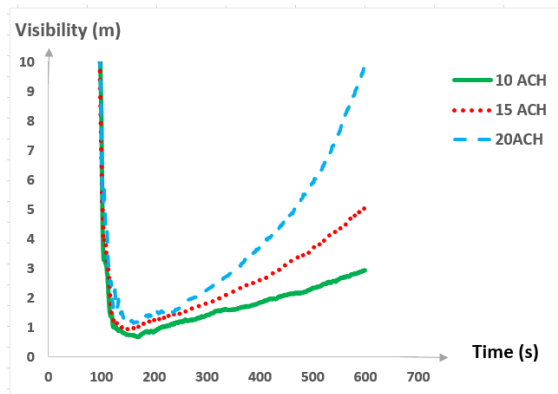
شکل ۸ گسترش میدان دید (۱۵ بار تعویض هوا)

Fig. 8 Expansion of the Field of View (15 Air Changes)

دید، تخلیه مؤثر دود و ارتقای ایمنی در شرایط اضطراری پارکینگ است.

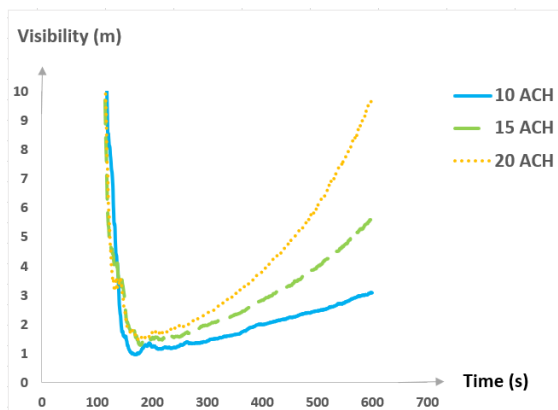
فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
ACH	تعداد تعویض هوا در ساعت
D^*	قطر مشخصه آتش (m)
F	نیروی حجمی (N/m^3)
g	نیروی گرانش (m/s^2)
I	شدت تابشی ($W/m^2.sr$)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W/(m.K)$)
Km	ضریب جذب جرمی (m^2/kg)
L	طول مسیر پرتو (m)
P	فشار (Pa)
Q	دبی (m^3/h)
qr	شار حرارتی تابشی (W/m^2)
$\dot{q}$	نرخ تولید حرارت (W/m^2)
S	عمق نوری (m)
T	دما (K)
u_i	سرعت (m/s)
V	مساحت (m^2)
Ys	کسر جرمی
α	ضریب نفوذ حرارتی (m^2/s)
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($kg/(m.s)$)
ρ	مولفه سرعت در راستای x (kg/m^3)
σ	ضریب جذب (m^{-1})
τ^*	عمق نوری
τ	تانسور تنش (pa)



شکل ۱۳ گستره میدان دید در ۱۵۰۰ متر مربع

Fig. 13 Field of View Extent at 1000 Square Meters



شکل ۱۴ نمای میدان دید در مقیاس بزرگ (۲۰۰۰ متر مربع)

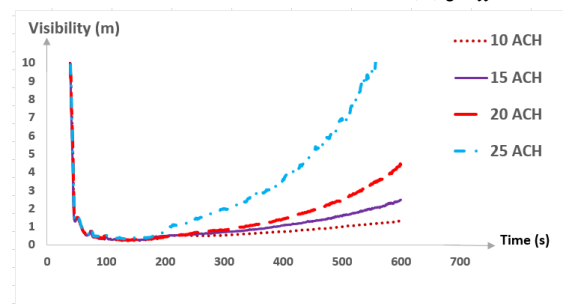
Fig. 14 Field of View Perspective at a Large Scale (2000 Square Meters)

۸- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر نرخ تعویض هوا بر میدان دید در پارکینگ‌هایی با مساحت‌های مختلف ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع به‌صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار پایروسیم مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارزیابی عملکرد سامانه تهویه در شرایط حریق و تعیین نرخ بهینه تعویض هوا برای حفظ میدان دید مناسب و افزایش ایمنی تخلیه اضطراری بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که:

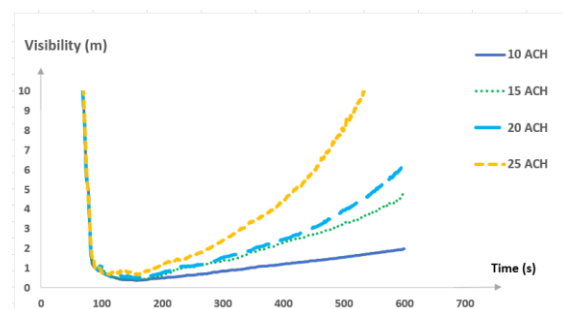
۱. در آغاز حریق، میدان دید در تمامی پارکینگ‌ها به‌طور ناگهانی کاهش یافته و در بازه زمانی حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ ثانیه به حداقل مقدار خود می‌رسد.

۲. در نرخ‌های پایین‌تر تعویض هوا (۱۰ و ۱۵ بار در ساعت)، برای تمام مساحت‌های پارکینگ، میدان دید هرگز به آستانه مطلوب استاندارد های NFPA و BS نمی‌رسد، در حالی که در نرخ‌های بیشتر تعویض هوا (۲۰ و ۲۵ بار در ساعت)، میدان دید بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد و شرایط ایمن‌تری حاصل می‌شود و میدان دید ۱۰ متر پس از ده دقیقه حاصل می‌شود.



شکل ۱۱ نمودار میدان دید برای مساحت ۵۰۰ متر مربع

Fig. 11 Field-of-view diagram for a 500 m² area



شکل ۱۲ وسعت میدان دید در ۱۰۰۰ متر مربع

Fig. 12 Field of View Extent at 1000 Square Meters

تعارض منافع: هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] Z. Zhang, "Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 3466–3475, 2007. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.002.
- [2] X. Deckers, S. Haga, and B. Sette, "Smoke control in case of fire in a large car park: Full-scale experiments," *Fire Safety Journal*, 2012. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.10.017.
- [3] X. Deckers, S. Haga, N. Tilley, and B. Merci, "Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations," *Fire Safety Journal*, vol. 57, pp. 22–34, 2013. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.02.005.
- [4] C. Juan-juan, Z. Fang, and J. Yuan, "Numerical simulation about smoke vent arrangement influence on smoke control in double-decked tunnel," *Procedia Engineering*, vol. 52, pp. 48–55, 2013. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.104.
- [5] J. Luo, X. Zhang, J. Zhao, and Z. Xu, "Fire experiment on temperature distribution in an underground vertical car park," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 15, p. 100513, 2019. doi: 10.1016/j.csite.2019.100513.
- [6] R. Wang, X. Lan, and L. Xu, "Smoke spread process under different heights based on numerical simulation," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, p. 100710, 2020. doi: 10.1016/j.csite.2020.100710.
- [7] Z. Long, C. Liu, Y. Yang, P. Qiu, X. Tian, and M. Zhong, "Full-scale experimental study on fire-induced smoke movement and control in an underground double-island subway station," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 103, p. 103508, 2020. doi: 10.1016/j.tust.2020.103508.
- [8] C. Wang, C. Du, and H. Zhang, "Numerical simulation of smoke natural filling in ultra-thin and tall atrium," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, p. 101521, 2021. doi: 10.1016/j.csite.2021.101521.
- [9] A. Kallianiotis, "Evaluation of fire smoke control in underground space," *Underground Space*, vol. 7, pp. 295–310, 2021. doi: 10.1016/j.undsp.2021.07.010.
- [10] S. M. J. Razeghi, M. Safarzadeh, and H. Pasdarshahri, "Evaluation of air curtain and emergency exhaust system for smoke confinement of an enclosure," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101650, 2021. doi: 10.1016/j.jobe.2020.101650.
- [11] M. Li, Y. Shen, Z. Zhang, J. Ji, and Z. Gao, "Theoretical and numerical study of smoke acceleration effect in the U-shaped shaft of a high-rise building," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 203, p. 109146, 2024. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109146.
- [12] B. Zhu, H. Cong, Z. Shao, H. Hu, L. Ye, Y. Bi, and Y. Zeng, "Numerical studies on the synergistic effects of smoke extraction and control performance by mechanical ventilation shafts during tunnel fires," *Underground Space*, vol. 21, p. 46–64, 2025. doi: 10.1016/j.undsp.2024.07.005.
- [13] BSI, *BS 7346-7: Components for Smoke and Heat Control Systems – Part 7: Code of Practice on Functional Recommendations and Calculation Methods for Smoke and Heat Control Systems for Covered Car Parks*, BSI Standards Publication, 2013.
- [14] UL Research Institutes, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, Fire Safety Research Institute, Columbia, MD, 2024.

۳. نرخ تعویض هوای بهینه برای پارکینگ‌ها جهت ایجاد میدان دید مناسب ۱۰ متر پس از ۱۰ دقیقه از زمان شروع حریق، با توجه به مساحت متفاوت است؛ برای مساحت‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمربع، این نرخ برابر با ۲۵ بار در ساعت و برای مساحت‌های ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع، برابر با ۲۰ بار در ساعت تعیین شده است.

۴. در فضاهای بزرگ‌تر، به دلیل حجم بیشتر دود، نرخ‌های پایین‌تر تعویض هوا اثربخشی محدودی در بهبود میدان دید دارند و نرخ‌های بالاتر تهویه برای حفظ ایمنی ضروری است.

۵. به طور کلی، نتایج نشان داد که افزایش نرخ تعویض هوا از ۱۰ تا ۲۵ بار در ساعت موجب تخلیه مؤثر دود، بهبود میدان دید و ارتقای سطح ایمنی تخلیه اضطراری می‌گردد. بر این اساس، نرخ‌های ۲۰ تا ۲۵ بار در ساعت به عنوان مقادیر بهینه برای طراحی سامانه تهویه اضطراری در پارکینگ‌ها پیشنهاد می‌شوند البته لازم بذکر است این مقادیر نرخ تعویض هوا، ابعاد کانال را افزایش می‌دهد که به لحاظ محدودیت در ارتفاع و فضاهای دسترسی در پارکینگ، امکان دارد محدودیت اجرایی را به همراه داشته باشد که باید مورد نظر قرار گیرد.

۶. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اتکا به نرخ تعویض هوای ۱۰ بار در ساعت که در برخی تفاسیر از استانداردهای عمومی آتش‌نشانی مانند توصیه‌های اولیه NFPA برای تهویه معمولی پارکینگ‌ها برای شرایط حریق پیشنهاد می‌شود، برای تأمین میدان دید ۱۰ متر در هیچ‌یک از پارکینگ‌های مورد مطالعه کافی نیست. در مقابل، استاندارد BS 7346-7 که یکی از معتبرترین منابع طراحی سیستم‌های تخلیه دود در پارکینگ‌های سرپوشیده محسوب می‌شود، علی‌رغم ارائه جزئیات دقیق درباره زمان‌بندی فعال‌سازی فن‌ها و نحوه جانمایی دریچه‌ها، مقدار عددی مشخصی برای نرخ تعویض هوا در شرایط حریق تعیین نمی‌کند. این خلأ استاندارد موجب شده است که مهندسان طراح غالباً به اعداد تجربی یا پیشنهاد‌های غیرمستند تکیه کنند. یافته‌های عددی حاضر برای نخستین بار نشان می‌دهد که برای دستیابی به معیار عملکردی میدان دید ۱۰ متر (که در اکثر آیین‌نامه‌های بین‌المللی به عنوان شرط لازم برای تخلیه ایمن پذیرفته شده است)، نرخ تعویض هوا باید به صورت وابسته به مساحت پارکینگ تعیین شود: برای پارکینگ‌های با مساحت ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مترمربع، نرخ ۲۵ بار در ساعت و برای پارکینگ‌های با مساحت ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مترمربع، نرخ ۲۰ بار در ساعت حداقل مقدار مورد نیاز است.

بیانیه هوش مصنوعی: در تصحیح و ویرایش متن، از هوش مصنوعی به عنوان ابزار جانبی و کمکی استفاده گردید.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

[17] H. Zhang, G. Yan, M. Li, and J. Han, "Analysis of the indoor fire risk based on the Pyrosim simulation," *Earth and Environmental Science*, vol. 636, p. 012002, 2021. doi: [10.1088/1755-1315/636/1/012002](https://doi.org/10.1088/1755-1315/636/1/012002).

[15] NIST, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, 6th ed., NIST Special Publication 1018-1, pp. 110–111, 2021.

[16] UL Research Institutes, Fire Dynamics Simulator User's Guide, Fire Safety Research Institute, Columbia, MD, 2024.