

Numerical Study on Improving Atrium Smoke Control Performance Using CO-Driven Non-Uniform Makeup Air Distribution

Milad Mehrpooya¹, Vahid Keikha Moghaddam², Najmeh Hajjaligol^{3*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, miladmehrpooya@mail.um.ac.ir.

² Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, vahid.keikha.m@gmail.com

³ **Corresponding author** Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran. n.hajjaligol@hut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received 2025.07.12

Received in revised form 2025.08.06

Accepted 2025.06.25

Available online 2025.09.28

Keywords

Smoke management
atrium fire
fire safety
make-up air
numerical simulation

ABSTRACT

Atria in multi-story buildings become highly vulnerable zones during fire incidents due to stack effect and the rapid accumulation of toxic gases, particularly carbon monoxide (CO). Supplying fresh air as a complement to smoke exhaust systems is essential; however, uniformly distributing the supply airflow cannot address the nonuniform smoke accumulation pattern across different floors. In this study, smoke movement, temperature, smoke layer height, and CO concentration in a four-story atrium were numerically analyzed using the FDS simulation tool. The focus was placed on evaluating nonuniform fresh-air distribution delivered exclusively through wall-mounted inlets. The main objective was to propose a CO-based approach for determining the optimal airflow distribution among the floors. Results indicate that allocating approximately 50–65% of the total supply airflow to the upper floors significantly reduces CO concentration, increases smoke layer height, and maintains safe egress conditions for a longer duration. The proposed distribution strategy can serve as a practical framework for designing smoke management systems in atria and is applicable even in conventional buildings without the need for underfloor air supply systems. The primary contribution of this research lies in introducing a CO-driven decision-making method and providing a detailed analysis of smoke behavior under various airflow distribution scenarios.

Introduction

Modern atrium buildings present unique challenges in fire safety engineering due to their large open volumes and vertical connectivity between floors. During a fire event, buoyancy-driven smoke flow combined with the stack effect accelerates smoke spread toward upper levels, rapidly compromising evacuation routes. Smoke inhalation, particularly exposure to carbon monoxide (CO), is recognized as the primary cause of injury and fatality in building fires, often occurring before occupants are exposed to critical thermal conditions.

Smoke control systems are therefore essential components of atrium fire safety design. Mechanical exhaust systems are commonly used to remove smoke, while makeup air systems are implemented to balance pressure differences and prevent excessive inflow velocities that could disrupt smoke stratification. International guidelines and standards, such as NFPA 92, emphasize the necessity of providing makeup air; however, they often lack detailed guidance on how this air should be distributed across multiple floors.

Most existing designs assume uniform makeup air distribution, implicitly suggesting equal fire risk across all levels. In reality, smoke concentration, temperature, and toxic gas accumulation vary significantly with height, and upper floors are generally exposed to more hazardous condition. Previous studies have investigated the effects of makeup air velocity, inlet location, and exhaust configuration, yet limited attention has been paid to floor-by-floor allocation strategies based on actual smoke toxicity indicators.

This research addresses this gap by proposing a CO-based approach for determining non-uniform makeup air distribution in a multi-story atrium. By prioritizing upper floors according to their exposure risk, the study aims to improve evacuation safety and provide a more rational basis for smoke control system design.

Methodology

A four-story atrium with realistic geometric dimensions is modeled using Fire Dynamics Simulator (FDS). The

Cite This Paper

Mehrpooya, Milad., Keikha Moqaddam, Vahid., & Hajjaligol, Najmeh. (2025). Numerical Study on Improving Atrium Smoke Control Performance Using CO-Driven Non-Uniform Makeup Air Distribution. *Fuel and Combustion*, 18 (3), 73-88. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.561952.1448> (In Persian)

ارجاع دهی به این مقاله



computational domain includes the atrium space, adjacent corridors, makeup air inlets at floor levels, and mechanical smoke exhaust outlets at the top of the atrium. A steady fire source with a constant heat release rate of 4 MW is placed at the ground level to represent a severe but plausible fire scenario.

The simulations employ the Large Eddy Simulation (LES) approach to resolve large-scale turbulent structures while modeling sub-grid scale effects using the Smagorinsky model. Combustion is modeled using an eddy dissipation concept, and CO generation is explicitly considered to evaluate toxic gas exposure. Radiation heat transfer is treated using the gray gas model.

Grid independence analysis is performed using three mesh resolutions, and the final mesh is selected based on accuracy and computational efficiency, satisfying recommended criteria for the ratio of characteristic fire diameter to grid size. Model validation is conducted by comparing predicted temperature histories at multiple atrium locations with available experimental data, showing good agreement.

Three makeup air distribution scenarios are defined:

1. Uniform distribution, where equal airflow is supplied to all floors.
2. Moderately non-uniform distribution, with increased airflow to upper floors.
3. Highly non-uniform distribution, where the majority of makeup air is supplied to the third and fourth floors.

All scenarios maintain the same total makeup air flow rate, consistent with NFPA recommendations. Performance is evaluated using time-averaged and transient values of temperature, CO concentration, and visibility at occupant breathing height along evacuation routes.

Discussion and Results

Simulation results reveal pronounced differences in smoke behavior and tenability conditions among the investigated scenarios. In the uniform distribution case, significant accumulation of CO is observed on upper floors, despite acceptable temperature levels. This indicates that temperature alone is insufficient as a design criterion for smoke control effectiveness.

Non-uniform makeup air distribution substantially alters the flow field. By increasing airflow to upper floors, downward pressure gradients are established that counteract buoyancy-driven smoke rise. The moderately non-uniform scenario improves conditions but remains insufficient to prevent hazardous CO levels during prolonged exposure.

The optimal scenario allocates approximately 55–60% of the total makeup air flow to the upper two floors. This configuration achieves the lowest CO concentration at evacuation paths, improves visibility beyond critical thresholds, and maintains temperatures within acceptable limits. Importantly, excessive airflow is avoided, preventing local turbulence and smoke re-entrainment that were observed when airflow was overly concentrated in a single floor.

Time-averaged results confirm that the proposed distribution strategy reduces CO concentration on the top floor by more than 20% compared to the uniform case, while extending tenable evacuation time. The results highlight the importance of balancing buoyancy forces and momentum introduced by makeup air.

Conclusion

This study demonstrates that uniform makeup air distribution is not an effective strategy for smoke control in multi-story atria. Due to the dominant influence of buoyancy and stack effect, upper floors experience disproportionately higher levels of smoke and toxic gases, particularly CO.

A CO-concentration-based approach for allocating makeup air flow is proposed and validated through detailed numerical simulations. The results indicate that supplying approximately 55–60% of the total makeup air to the upper floors significantly enhances evacuation safety by reducing CO concentration, improving visibility, and maintaining stable thermal conditions.

The proposed methodology provides a practical and economical framework that can be integrated into existing smoke control design practices and standards. By focusing on toxic gas distribution rather than temperature alone, designers can achieve more reliable and performance-based smoke management in atrium buildings.

Author Contributions

Milad Mehrpooya: Conceptualization, numerical modeling, simulation using FDS, data analysis, and manuscript drafting.

Vahid Keikha Moqaddam: Methodology development, result interpretation, and technical review.

Najmeh Hajjaligol: Supervision, validation of numerical approach, critical revision of the manuscript, and final approval.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

Authors should declare any conflict of interest or state: Authors declare no conflict of interest.

مطالعه عددی بهبود عملکرد سیستم کنترل دود آتریوم از طریق توزیع غیریکسان هوای جبرانی مبتنی بر غلظت CO

میلاذ مهرپویا^۱، وحیدکیخای مقدم^۲، نجمه حاجی‌علی‌گل^{۳*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، MialdMehrpooya@mail.um.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، vahid.keikha.m@gmail.com

^۳ نویسنده مخاطب، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، n.hajjaligol@hut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶</p> <p>کلیدواژه‌ها: مدیریت دود حریق آتریوم ایمنی آتش هوای جبرانی شبیه سازی عددی</p>	<p>آتریوم‌ها به‌عنوان فضاهای باز مرکزی در ساختمان‌های چندطبقه، در زمان آتش‌سوزی به دلیل اثر دودکشی و تجمع گازهای سمی، به‌ویژه منوکسید کربن، به بخش‌هایی بسیار آسیب‌پذیر تبدیل می‌شوند. تأمین هوای جبرانی به‌عنوان مکمل سیستم تخلیه دود در چنین فضاهایی ضروری است، اما توزیع یکنواخت دبی هوای جبرانی در طبقات نمی‌تواند پاسخگوی تفاوت الگوی تجمع دود در طبقات مختلف باشد. در این پژوهش، رفتار دود، دما، ارتفاع لایه دود و غلظت CO در یک آتریوم چهارطبقه با استفاده از نرم‌افزار FDS شبیه‌سازی شده و تأثیر توزیع غیریکنواخت دبی هوای جبرانی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارائه رویکردی مبتنی بر غلظت CO برای تعیین نسبت بهینه دبی هوای جبرانی بین طبقات است. نتایج نشان می‌دهد که اختصاص حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد از دبی کل به دوطبقه بالایی، بیشترین کاهش غلظت CO و مسیرهای تخلیه را برای مدت طولانی‌تری در شرایط ایمن نگه می‌دارد. الگوی ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان چارچوبی کاربردی در طراحی سیستم‌های مدیریت دود در آتریوم‌ها مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری اصلی این پژوهش ارائه روش تصمیم‌گیری برای توزیع هوای جبرانی براساس غلظت CO و تحلیل دقیق رفتار دود در سناریوهای مختلف توزیع دبی است.</p>

مقدمه

آتریوم‌ها در هنگام وقوع آتش به یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های ساختمان از نظر ایمنی تبدیل می‌شوند، زیرا ساختار باز و ارتفاع زیاد آن‌ها شرایطی را ایجاد می‌کند که موجب تسریع حرکت دود به سمت طبقات بالاتر می‌شود [۱]. این پدیده که عمدتاً ناشی از اثر دودکشی است، باعث می‌شود دود و گازهای سمی به‌سرعت در فضای آتریوم و طبقات مجاور پخش شده و محیط را برای ساکنین بسیار خطرناک کند [۲]. گازهای سمی موجود در دود، به‌ویژه مونوکسیدکربن (CO)، به‌عنوان مهم‌ترین عامل مرگ‌ومیر در حوادث آتش‌سوزی شناخته می‌شوند و می‌توانند در زمان کوتاهی موجب بیهوشی و مرگ افراد شوند [۳]. بنابراین کنترل حرکت دود و تأمین یک مسیر امن برای تخلیه افراد در شرایط اضطراری یکی از مهم‌ترین موضوعات در طراحی سامانه‌های مدیریت دود در آتریوم‌ها محسوب می‌شود.

در مطالعات مرتبط با کنترل دود، همواره بر اهمیت تأمین هوای جبرانی در کنار سامانه تخلیه دود تأکید شده است، زیرا خروج دود بدون ورود هوای جبرانی باعث ایجاد فشار منفی در فضا شده و عملکرد سامانه تخلیه دود را مختل می‌کند [۴]. استانداردها و دستورالعمل‌های بین‌المللی مانند NFPA نیز بر لزوم استفاده از سامانه‌های هوارسانی جبرانی تأکید کرده‌اند تا از کاهش فشار بیش از حد و از بین رفتن تعادل جریان هوا جلوگیری شود. از سوی دیگر، استفاده از هوای جبرانی به‌صورت غیرسازمان‌یافته و طبیعی می‌تواند موجب کج‌شدن شعله، تشدید ناپایداری جریان، گسترش آتش و تشدید حرکت دود شود [۵].

Cite This Paper

Mehrpooya, Milad., Keikha Moqaddam, Vahid., & Hajjaligol, Najmeh. (2025). Numerical Study on Improving Atrium Smoke Control Performance Using CO-Driven Non-Uniform Makeup Air Distribution. Fuel and Combustion, 18 (3), 73-88. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.561952.1448> (In Persian)

ارجاع‌دهی به این مقاله



به همین دلیل، تأمین مکانیکی و کنترل شده‌ی هوای جبرانی از اهمیت زیادی برخوردار است و تلاش‌های متعددی در سال‌های اخیر برای طراحی و بهینه‌سازی این سامانه‌ها صورت گرفته است.

بخش مهمی از پژوهش‌ها به بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار دود در آتریوم‌ها اختصاص یافته است، از جمله اثر سرعت جریان هوای جبرانی، نحوه آرایش دریچه‌ها، موقعیت ورودی‌ها و مکانیابی سامانه‌های تخلیه دود [۶]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که آرایش مناسب سامانه هوارسانی می‌تواند ارتفاع لایه دود را افزایش داده، دمای محیط را کنترل کند و مسیرهای تخلیه را از آلودگی دور نگه دارد [۷]. با این حال، سرعت بیش از حد جریان ورودی هوا می‌تواند موجب تلاطم قابل توجه جریان دود شده و در نتیجه باعث کاهش ارتفاع لایه پاک و افزایش خطر برای افراد شود [۸]. این موضوع سبب شده است که طراحی سرعت و دبی مناسب هوای ورودی به‌عنوان یکی از حساس‌ترین بخش‌های مدیریت دود شناخته شود.

علاوه بر مطالعات فوق، پژوهشگران در سال‌های اخیر به موضوعات پیشرفته‌تری مانند مدل‌سازی عددی، استفاده از روش‌های مقیاس‌سازی و تحلیل اثرات متقابل ورودی و خروجی هوا پرداخته‌اند [۹]. مدل‌سازی عددی، به‌ویژه با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند FDS، ابزار بسیار قدرتمندی برای تحلیل رفتار پیچیده دود در فضاهای بزرگ فراهم کرده است. استفاده از شبکه‌های LES و مدل‌های احتراق مبتنی بر کسری اختلاط نیز موجب شده است که شبیه‌سازی جریان دود و گازهای سمی با دقت بیشتری انجام شود. این مدل‌ها امکان بررسی تأثیرات غلظت CO، دما و دید را فراهم می‌کنند که از مهم‌ترین شاخص‌های ایمنی در زمان آتش‌سوزی هستند [۱۰].

باوجود پیشرفت‌های مهم در حوزه مدیریت دود، یک خلأ پژوهشی قابل توجه همچنان وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین بر مواردی مانند توزیع یکنواخت دبی بین طبقات، بررسی رفتار دود در شرایط مشخص یا مطالعه اثر یک نوع سامانه هوارسانی متمرکز بوده‌اند [۱۱]. با اینکه برخی از مطالعات به بررسی تأمین هوای جبرانی از طریق یک یا چند نوع دریچه پرداخته‌اند، اما موضوع تخصیص بهینه دبی هوای جبرانی میان طبقات بر اساس وضعیت واقعی آلودگی دود و غلظت CO کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در واقع بسیاری از طرح‌های موجود فرض می‌کنند که شرایط هر طبقه مشابه بوده و می‌توان جریان هوای جبرانی را به‌صورت مساوی بین طبقات توزیع کرد؛ در حالی که توزیع دود و CO در آتریوم‌ها به‌شدت ناهمگن بوده و طبقات بالاتر معمولاً با خطر بیشتری مواجه می‌شوند.

از آنجا که رفتار دود در آتریوم‌ها متأثر از اختلاف دما، اثر دودکشی، هندسه فضا و شرایط تهویه است، تمرکز بر غلظت CO به‌عنوان شاخص اصلی خطر می‌تواند رویکرد مؤثرتری برای تحلیل و کنترل دود باشد. CO نه‌تنها عامل اصلی بروز مرگ و ناتوانی در آتش‌سوزی‌ها است، بلکه به دلیل انتشار سریع‌تر و تجمع تدریجی، شاخص بهتری نسبت به دما برای تعیین خطر محسوب می‌شود [۱۲]. بنابراین تخصیص هوای جبرانی با توجه به غلظت CO هر طبقه می‌تواند عملکرد سامانه مدیریت دود را به شکل قابل توجهی بهبود دهد.

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FDS و بهره‌گیری از مدل LES، رفتار دود، دما و غلظت CO در آتریوم چندطبقه تحت شرایط مختلف توزیع دبی هوای جبرانی بررسی شده است. در این مطالعه، برخلاف برخی تحقیقات گذشته که از ترکیب ورودی‌های کف و دیوار استفاده کرده‌اند، فقط از ورودی‌های دیواری برای تزریق هوای جبرانی استفاده شده است. این موضوع موجب سادگی سیستم، کاهش هزینه اجرا و امکان‌پذیری بیشتر در ساختمان‌های معمولی می‌شود.

نوآوری اصلی پژوهش در این است که به‌جای توزیع یکنواخت دبی یا تمرکز بر یک طبقه خاص، یک رویکرد مبتنی بر غلظت CO برای تعیین نسبت بهینه دبی هوای جبرانی در هر طبقه ارائه شده است. در این رویکرد، شرایط واقعی انتشار دود در هر طبقه تحلیل شده و سپس سهم مناسب هر طبقه از مجموع دبی هوای جبرانی تعیین می‌شود تا بهترین عملکرد در جلوگیری از ورود دود به مسیرهای تخلیه حاصل شود. این روش می‌تواند همانند یک چارچوب طراحی مورد استفاده مهندسان قرار گیرد و به طور بالقوه در استانداردهای آینده وارد شود.

روش حل و صحت‌سنجی

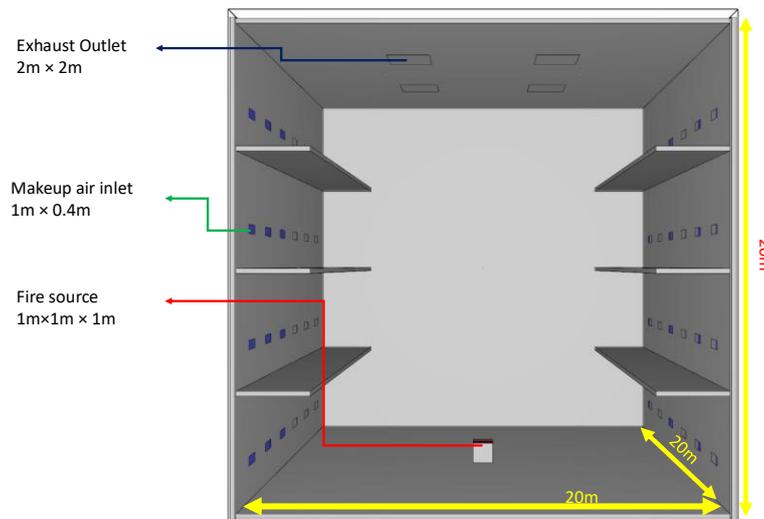


Figure 1 – Schematic of the simulated atrium

شکل ۱- شماتیکی از آتریوم شبیه‌سازی شده

در این پژوهش، با هدف تحلیل رفتار دود، دما و گازهای سمی در یک آتریوم چندطبقه و تعیین نسبت بهینه توزیع دبی هوای جبرانی بین طبقات، یک مدل عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی توسعه داده شد که تمرکز اصلی آن، بررسی توزیع غلظت CO در مسیرهای تخلیه و ایجاد یک شاخص تصمیم‌گیری برای اختصاص هوای جبرانی به طبقات مختلف است. به همین منظور، ابتدا طرح مسئله به‌گونه‌ای تعریف شد که بتواند شرایط واقعی انتشار دود در یک آتش‌سوزی در فضای آتریوم را بازنمایی کند و هم‌زمان امکان آزمون سناریوهای مختلف توزیع دبی هوای جبرانی را فراهم آورد. در این راستا، یک مدل سه‌بعدی شامل چهار طبقه، یک فضای مرکزی آتریوم، مجموعه‌ای از دریچه‌های خروج دود و تأمین هوای جبرانی و در ارتفاع‌های مختلف مانند شکل ۱ طراحی شد که تنها از ترکیب ورودی‌های دیواری برای تزریق هوای جبرانی استفاده می‌کند. هر طبقه دارای یک ناحیه آزادسازی هوا در ارتفاعی مشخص از سطح کف است تا الگوی طبیعی تخلیه افراد در زمان حادثه شبیه‌سازی شود.

در تعریف طرح مسئله، فرض شده است که همه شرایط ورودی و خروجی سیستم ثابت نگه‌داشته شده و تنها متغیر تصمیم‌گیری، نسبت دبی هوای جبرانی اختصاص‌یافته به هر طبقه است. این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که توزیع دود در آتریوم‌ها یک الگوی یکنواخت نیست و طبقات بالا معمولاً در معرض غلظت بیشتر CO قرار می‌گیرند. به همین دلیل، هدف این است که به‌جای تخصیص یکنواخت دبی، الگویی ارائه شود که هوای جبرانی را براساس نیاز واقعی هر طبقه تخصیص دهد؛ به‌گونه‌ای که مسیرهای تخلیه^۱ در شرایط ایمن باقی بمانند. برای تحقق این هدف، در مرحله اول لازم بود مفاهیم پایه‌ای مانند رفتار لایه دود، تأثیر اثر دودکشی، مکانیسم تجمع CO در طبقات بالا، و نقش فشار دینامیک ورودی هوا تحلیل شود؛ بنابراین، مجموعه‌ای از مفاهیم فیزیکی نظیر جابه‌جایی طبیعی، گسترش قائم دود، تشکیل لایه گرم، مکانیسم آشفستگی ناشی از ورودی‌های هوای جبرانی و همچنین وابستگی غلظت CO به سرعت احتراق، در مدل در نظر گرفته شد.

¹ Available Avacuation Passageway

حریق ماهیتی به شدت آشفته دارد و در نتیجه، نحوه مدل سازی آشفتگی یکی از مهم ترین ویژگی های هر روش دینامیک سیالات محاسباتی است. از میان سه رویکرد اصلی برای حل معادلات جریان های آشفته، نرم افزار FDS تنها از دو روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) و شبیه سازی عددی مستقیم (DNS) بهره می گیرد. در مسائل سی اف دی^۱، وجود نوسانات زمانی و مکانی در مقیاس های بسیار کوچک نیازمند روشی برای کاهش اثرات این مقیاس ها بر حل معادلات است. در مدل LES این کار از طریق اعمال فیلتر انجام می شود. فیلترگذاری در واقع یک بازنویسی از معادلات ناویراستوکس است که طی آن، گردابه هایی با اندازه کوچک تر از اندازه فیلتر - که معمولاً همان ابعاد شبکه محاسباتی است - از حل صریح معادلات حذف می شوند. به این ترتیب، شکل فیلتر شده هر یک از معادلات حاکم به کار گرفته می شود که نخستین آن ها معادله پیوستگی است و می توان آن را مطابق رابطه (۱) بیان کرد.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

در معادله (۱)، \bar{u} سرعت، t زمان و \bar{p} چگالی است. معادله بقای تکانه به صورت فیلترگیری شده در معادله (۲) بیان شده است:

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

در معادله بالا، μ_{eff} گرانروی دینامیکی و \bar{P} فشار است. گرانروی دینامیکی، شامل مجموع μ ، گرانروی مولکولی و μ_{sgs} گرانروی مقیاس زیر شبکه است. μ_{sgs} برابر حاصل ضرب ν_{sgs} در $\bar{\rho}$ است. ν_{sgs} گرانروی سینماتیکی زیر شبکه است که مقدار آن با استفاده از مدل اسماکورینسکی محاسبه می شود. شکل فیلترگیری شده بقای انرژی در معادله (۳) بیان شده است:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{h}_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{h}_s) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_{th} + \frac{\nu_{\text{sgs}}}{pr_t} \right) \nabla \bar{h}_s \right] - \nabla \cdot \bar{q}_r'' + \bar{q}_c''' \quad (3)$$

در معادله (۳)، D_{th} ضریب انتشار حرارتی، \bar{q}_r'' شار حرارتی تابشی، \bar{q}_c''' نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق، \bar{h}_s انرژی محسوس و pr_t عدد پرائنل جریان آشفته است. شکل فیلترگیری شده بقای گونه ها در معادله (۴) بیان شده است:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{Y}_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{Y}_k) = \nabla \cdot \left[\bar{\rho} \left(D_k + \frac{\nu_{\text{sgs}}}{sc_t} \right) \nabla \bar{Y}_k \right] + \bar{\omega}_k''' \quad (k = 1, \dots, N_s - 1) \quad (4)$$

در معادله (۴)، D_k ضریب انتشار جرم گونه، \bar{Y}_k کسر جرمی گونه، sc_t عدد اشمیت آشفته هستند. در این معادله از تأثیر گرادیان فشار و دما بر ضریب نفوذ صرف نظر شده است. $\bar{\omega}_k'''$ نرخ واکنش گونه است که با استفاده از مدل احتراقی اتلاف گردابه ای (ای دی ام^۲) محاسبه می شود.

در نرم افزار شبیه ساز دینامیک آتش انتقال حرارت تابشی به صورت یک معادله انتقال گاز خاکستری^۳ حل می شود. معادله انتقال تشعشع^۴ برای محیطی شامل جذب^۵، نشر^۶، پخش^۷ به صورت رابطه (۵) است:

¹ Computational Fluid Dynamics(CFD)

² Eddy Dissipation Model (EDM)

³ Gray gas

⁴ Radiative Transport Equation

⁵ Absorption

⁶ Emitting

⁷ Scattering

$$s \cdot \nabla I_{\lambda}(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)]I(x, s) + B(x, \lambda) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s')I_{\lambda}(x, s')d\Omega' \quad (5)$$

که در آن $I_{\lambda}(x, s)$ شدت تابش در طول موج λ است، s بردار جهت شدت، $\kappa(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$ به ترتیب ضرایب جذب و پراکندگی محلی هستند و $B(x, \lambda)$ عبارت منبع انتشار است و برابر با مقدار حرارتی است که توسط مخلوط محلی گاز، دوده و ذرات منتشر می‌شود. انتگرال در سمت راست، انرژی تشعشی پراکنده شده از جهات دیگر را توصیف می‌کند [۱۳]. این مفاهیم مبنای الگوسازی نظری سیستم را تشکیل می‌دهند و تعیین می‌کنند که در کدام نقاط مدل باید اندازه‌گیری، نمونه‌برداری یا تحلیل دقیق‌تری انجام شود.

در بخش الگوسازی عددی، از نرم‌افزار FDS به‌عنوان یک ابزار مبتنی بر روش تفاضل محدود و مدل آشفتگی LES استفاده شد تا بتوان رفتار لحظه‌ای دود، دما و غلظت CO را در مقیاس بزرگ تحلیل کرد. شبیه‌سازی‌های این پژوهش با نرم‌افزار Pyrosim 2024 انجام شده است که مطابق Release Notes/manual این نسخه برای FDS طراحی شده است. در این مطالعه کلیه پارامترهای LES و انتقال اسکالرها مطابق مقادیر پیش فرض FDS استفاده شده و هیچ تغییر در تنظیمات پیش فرض از جمله ضرایب SGS اعمال نشده است. مقادیر ثابت پیش فرض مورد استفاده قرار گرفته در انتقال اسکالرها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- مقادیر پیش فرض شبیه سازی

Table 1 – Default simulation parameters

Turbulent Schmidt Number	0.5
Turbulent Prandtl Number	0.5
Smagorinsky Constant	0.2

این نرم‌افزار به طور گسترده در مطالعات آتریوم و فضاهای بزرگ به‌کاررفته و امکان مدل‌سازی احتراق کنترل‌شده، انتشار گازهای سمی، تشکیل لایه دود و تعامل آن با سیستم تهویه مکانیکی را فراهم کرده است. در مرحله الگوسازی، ابتدا هندسه کامل آتریوم شامل چهارطبقه و فضای داخلی آن با ابعاد واقعی مطابق جدول ۲ مدل‌سازی شد.

جدول ۲- ابعاد هندسی مدل شبیه سازی شده

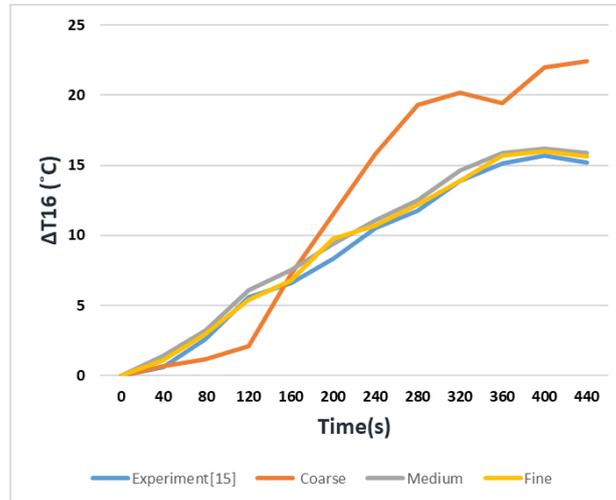
Table 2 – Geometric dimensions of the simulated model

Space	Length (m)	Width (m)	Height (m)
Atrium	20	20	20
Corridor	20	3	5
Make-up Air Inlet Region	1	-	0.4
Smoke Exhaust Chamber	0.4	0.4	-

تعیین مناسب اندازه سلول‌های شبکه‌بندی از عوامل کلیدی در محاسبات عددی است، زیرا دقت نتایج مستقیماً تحت‌تأثیر ابعاد سلول‌ها قرار دارد. به همین دلیل انتخاب فواصل شبکه باید با دقت انجام شود و این مقادیر بسته به هندسه، شرایط مرزی و ماهیت هر مسئله می‌تواند متفاوت باشد. معمولاً لازم است اندازه سلول‌ها تا حدی کاهش یابد که کوچک‌تر کردن بیشتر آن‌ها تغییری محسوس در نتایج نهایی ایجاد نکند [۱۴]؛ فرآیندی که در ادبیات عددی با عنوان تحلیل حساسیت شبکه‌بندی شناخته می‌شود شبکه محاسباتی به‌کاررفته در این مطالعه از سلول‌های کارترزین تشکیل شده است و ابعاد آن‌ها بر اساس قطر مشخصه آتش (D^*) تعیین شده، مقداری که طبق رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (6)$$

در این معادله، \dot{Q} بیانگر نرخ آزادسازی حرارت آتش برحسب کیلووات است که مقدار ثابت 4MW در نظر گرفته شده است و مقادیر ρ_{∞} ، c_p و T_{∞} به ترتیب ظرفیت حرارتی ویژه هوا (کیلوژول بر کیلوگرم کلوین)، چگالی محیط (کیلوگرم بر مترمکعب) و دمای محیط (کلوین) را نشان می‌دهند.



شکل ۲- نمودار استقلال از شبکه محاسباتی

Figure 2 – Computational grid independence plot

برای ارزیابی تأثیر وضوح شبکه بر نتایج شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت مدل با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از شبکه‌ها با ابعاد سلول مختلف (Δx) انجام شد؛ به‌گونه‌ای که شرط $4 \leq \left(\frac{D^*}{\delta x}\right) \leq 16$ رعایت شود. در این پژوهش مقدار D^* برابر با ۰/۵۵۱ متر محاسبه شد. نتایج این بررسی نشان داد که شبکه‌های بسیار درشت اختلاف قابل توجهی با نتایج حاصل از شبکه‌های ریزتر و نسبت به نتایج آزمایشگاهی [۱۵] دارند و نمی‌توانند رفتار واقعی جریان را با دقت کافی بازتولید کنند که در شکل ۲ مشخص است.

بر اساس این تحلیل، نسبت $\frac{D^*}{\delta x} = 10$ به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد که منجر به استفاده از ۱۶۳۰۰۰۰ سلول محاسباتی شد. مشخصات شبکه‌هایی که در فرایند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند، در جدول ۳ ارائه شده است.

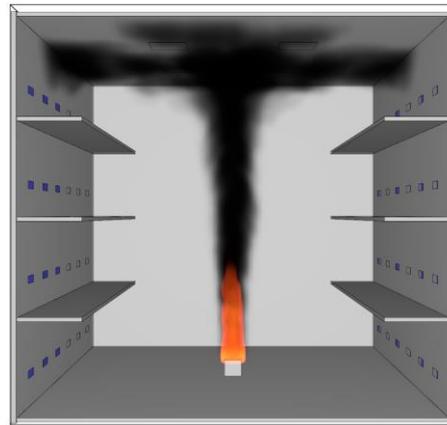
جدول ۳- مشخصات شبکه حل

Table 3 – Mesh specifications

Simulation	Mesh Type	Mesh Resolution ($D^*/\delta x$)	Grid Size Δx (cm)	Number of Cells
1	Coarse	4	43.5	104600
2	Medium	10	17.4	1630000
3	Fine	16	10.9	6640000

به‌منظور مدل‌سازی احتراق، از یک منبع حرارتی با نرخ آزادسازی ثابت استفاده شد تا رفتار دود در شرایط پایدار قابل تحلیل باشد. برای تعیین پارامترهای احتراق از مدل مبتنی بر کسری اختلاط استفاده شد که ویژگی اصلی آن، شبیه‌سازی روند تشکیل CO و توزیع آن در فضا است.

در این مدل، گازهای احتراق شامل CO، CO₂ و سایر محصولات احتراق به صورت تابعی از شدت واکنش، میزان احتراق ناقص و ترکیب سوخت شکل می‌گیرند. این مدل به طور خاص برای تحلیل آلودگی مسیرهای تخلیه مناسب است، زیرا CO یکی از اصلی‌ترین شاخص‌های سمی بودن دود محسوب می‌شود. در شکل ۳، مدل ایجاد شده در لحظات اولیه احتراق نشان داده شده است.



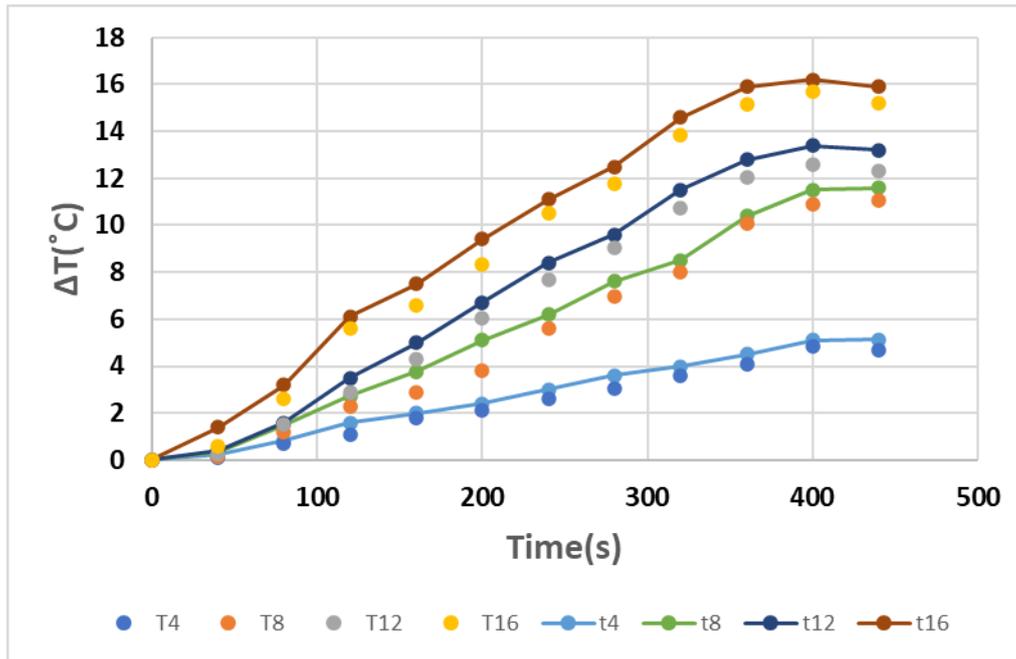
شکل ۳- شماتیکی از لحظات اولیه حریق

Figure 3 – Schematic of the early moments of the fire

در بخش تحلیل نظری، مفهوم شاخص دید، دمای مسیر و غلظت CO به عنوان سه معیار اصلی ارزیابی ایمنی مسیر تخلیه مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به استاندارد NFPA92b برای فضای مورد بررسی در این پژوهش جریان اگزاست یا خروجی ۳۸۴۱۲۰ متر مکعب بر ساعت می باشد. همچنین با توجه به استاندارد، مجموع دبی هوای جبرانی ۰/۹ این مقدار یعنی ۳۴۵۷۰۸ متر مکعب بر ساعت است.

روش حل ارائه شده برای تحلیل مسئله شامل چند مرحله است. در مرحله اول، مدل پایه با توزیع یکنواخت دبی هوای جبرانی اجرا شد تا رفتار طبیعی دود و میزان آلودگی هر طبقه بدون مداخله هوشمندانه مشخص شود. در مرحله دوم، غلظت CO در مسیرهای تخلیه هر طبقه استخراج شد و الگوی افزایشی غلظت در طبقات بالا مورد بررسی قرار گرفت. این الگو نشان داد که توزیع یکنواخت دبی نمی‌تواند پاسخگوی نیاز واقعی طبقات باشد و لازم است که دبی هوای جبرانی بر اساس نیاز هر طبقه تنظیم شود. در مرحله سوم، چند سناریوی مختلف توزیع دبی تعریف شد؛ در این سناریوها نسبت تخصیص هوا به هر طبقه تغییر داده شد تا بتوان بهترین الگو را استخراج کرد. هر سناریو شامل مجموعه‌ای از نسبت‌ها بود که مطابق با شدت آلودگی طبقات تعریف شده بود. در مرحله چهارم، عملکرد سیستم در هر سناریو بر اساس سه شاخص اصلی یعنی دما، دید و غلظت CO تحلیل شد. هدف این بود که حداقل یکی از شاخص‌ها بهبود قابل توجهی نشان دهد بدون آنکه شاخص‌های دیگر دچار افت عملکرد شوند. در مرحله پنجم، الگویی انتخاب شد که بیشترین سطح ایمنی را در مسیرهای تخلیه ایجاد کند و کمترین میزان دود و CO به آن نفوذ کند. این الگو به عنوان الگوی پیشنهادی معرفی شد.

برای صحت‌سنجی مدل، مقایسه اختلاف دمای نقاط اندازه‌گیری T4، T8، T12 و T16 به ترتیب با مختصات (۱۰ و ۰/۵)، (۶ و ۰/۵ و ۱۰ و ۱۱ و ۰/۵) و (۱۰ و ۰/۵) برحسب متر، پیش‌روپس از وقوع حریق که از نتایج آزمایشگاهی ژانگ و همکاران [۱۵] به دست آمده بود، با مقادیر محاسبه شده در شبیه‌سازی عددی انجام شد که در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳- مقایسه اختلاف دمای نقاط مختلف آتریوم با نتایج آزمایشگاهی [۱۷]

Figure 4 – Comparison of the temperature at various atrium points with the experimental results [17]

همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، مقادیر عددی کمی بیشتر از داده‌های تجربی هستند؛ موضوعی که احتمالاً ناشی از نشتی هوا در بخش‌هایی از دهلیز آزمایشگاهی و عدم انسداد کامل مدل بوده است. بیشینه اختلاف دمای ΔT میان داده‌های تجربی و نتایج عددی ۴/۷۸٪ گزارش شد. با این حال، هم‌خوانی مناسب بین دو مجموعه داده نشان می‌دهد که مدل عددی و شرایط مرزی تعریف‌شده در این مطالعه قابل اعتماد بوده و دقت لازم را در پیش‌بینی رفتار دود و دما فراهم کرده‌اند.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف توزیع دبی هوای جبرانی در آتریوم چندطبقه ارائه و تحلیل می‌شود. هدف اصلی تحلیل نتایج، بررسی رفتار دود، دما، دید و به‌ویژه غلظت CO در طبقات مختلف تحت الگوهای متفاوت توزیع دبی است تا مشخص شود کدام الگو می‌تواند بهترین سطح عملکرد را در حفظ ایمنی مسیرهای تخلیه فراهم کند. برای این منظور، رفتار سه مدل توزیع دبی مطابق جدول ۴ بررسی شد. سناریو (الف) حالت ابتدایی هست که دبی در تمام طبقات یکسان توزیع شده است. سناریو (ب) و (ج) بر این اساس انتخاب شده که در حالت بدون وجود هوای جبرانی غلظت CO اندازه‌گیری شده است. برای سناریو (ج) اندازه‌گیری این غلظت در لحظه‌نهایی شبیه‌سازی انجام شده و سناریوی (ب) به صورت یک حالت میانی بین (الف) و (ج) در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- جزئیات سناریوهای مختلف توزیع هوای جبرانی

Table 4 – Details of the different makeup-air distribution scenarios

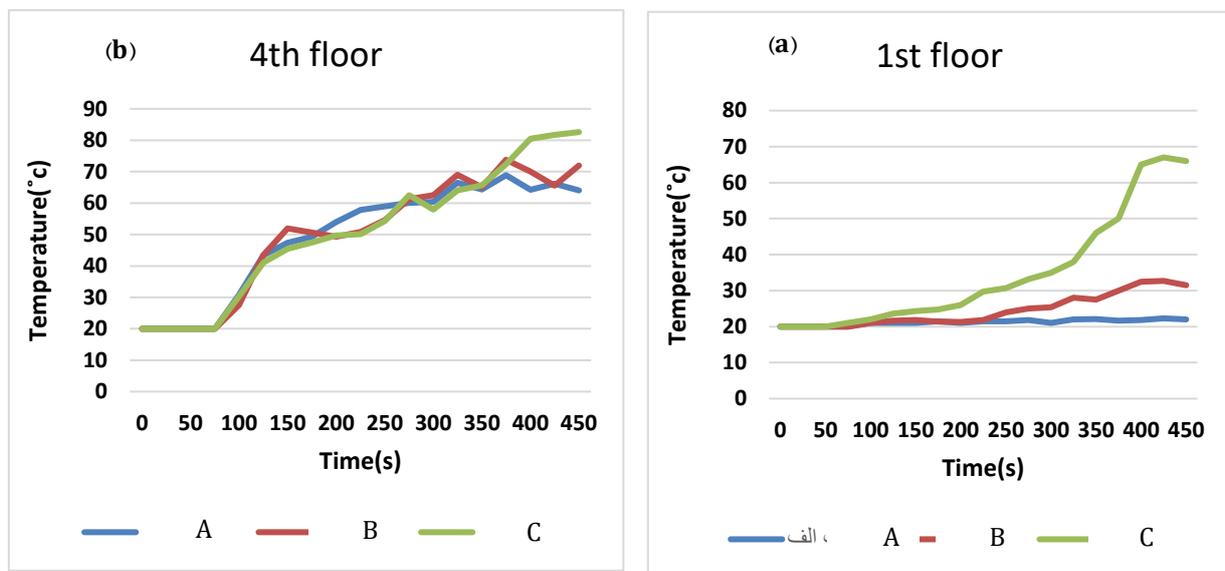
Scenario	Make-up Air Rate (%)			
	First Floor	Second Floor	Third Floor	Fourth Floor
A	25%	25%	25%	25%
B	19.8%	24.2%	26.9%	29.1%

C	2.3%	13.7%	38.3%	45.7%
---	------	-------	-------	-------

در تمامی تحلیل‌ها، داده‌ها از نقاطی در نزدیکی مسیر خروج اضطراری استخراج شده‌اند، زیرا این نقاط مهم‌ترین نقاط در تعیین وضعیت ایمنی محسوب می‌شوند.

۱. رفتار دما در سناریوهای مختلف

دما یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در ارزیابی ایمنی مسیر تخلیه است. نتایج مطابق شکل ۵ نشان داد که در سناریو الف، افزایش سریع دما در طبقات بالایی به دلیل تجمع دود و انتقال حرارت همرفتی اتفاق افتاد. با اعمال سناریوهای غیریکنواخت، مشخص شد که اختصاص دبی بیشتر به طبقات بالاتر باعث کاهش دما در ارتفاع تنفس افراد می‌شود. این کاهش دما در طبقات بالا با کاهش حجم دود و کاهش سرعت تجمع CO ارتباط مستقیم دارد.



شکل ۴- دما در طول زمان در (الف) طبقه اول و (ب) طبقه چهارم در سناریوهای مختلف

Figure 5 – Temperature over time at (a) the first floor and (b) the fourth floor in the different scenarios

در سناریوهایی که دبی بیشتری به طبقات سوم و چهارم اختصاص یافت، میانگین زمانی دما در جدول ۵ نشان داد که اختلاف دما بین طبقات کاهش یافته است. این سناریو‌ها دمای پایین‌تری را در طبقات بالایی موجب شده‌اند. در مقابل، سناریو ای که دبی هوای جبرانی را به‌طور افراطی به یک طبقه خاص هدایت می‌کرد، از نظر پایداری جریان رفتار مناسبی نداشتند و در برخی موارد سبب ایجاد جریان‌های ناخواسته و آشفته‌گی محلی در آن طبقه می‌شدند. بنابراین، نتایج نشان داد که افزایش دبی در طبقات بالا در یک حد مشخص مؤثر است، اما افزایش بیش از حد می‌تواند اثر معکوس ایجاد کند و ساختار جریان را ناپایدار کند.

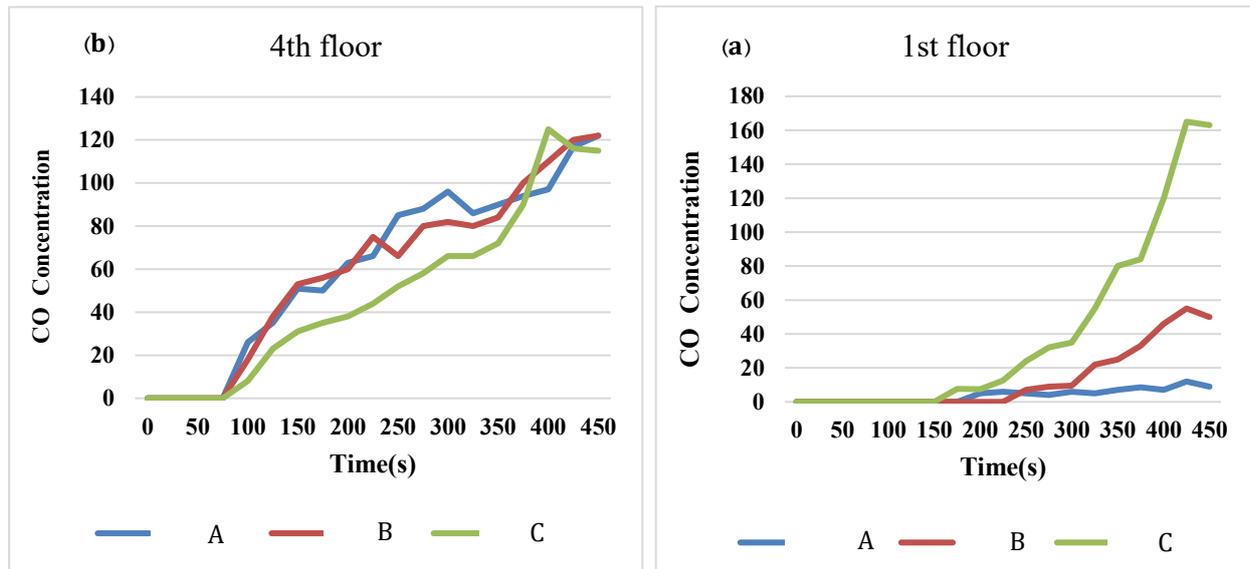
جدول ۵ - میانگین زمانی دمای طبقات در سناریوهای مختلف

Table 5 – Time-averaged floor temperatures in the different scenarios

Scenario	Temperature of the First Floor	Temperature of the Fourth Floor
A	22.233	51.264
B	24.436	50.088
C	34.405	50.800

۲. تحلیل غلظت CO بر اساس توزیع‌های مختلف دبی

مهم‌ترین بخش نتایج پژوهش، تحلیل غلظت CO در مسیرهای تخلیه است، زیرا CO خطرناک‌ترین گاز سمی ناشی از احتراق است. با اعمال سناریوهای مختلف، نتایج نشان داد که توزیع دبی بر اساس شدت آلودگی می‌تواند به شکل قابل‌توجهی غلظت CO را کاهش دهد.



شکل ۵ - غلظت CO در طول زمان در (الف) طبقه اول و (ب) طبقه چهارم در سناریوهای مختلف

Figure 6 – CO concentration over time at (a) the first floor and (b) the fourth floor in the different scenarios

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شد، در سناریو اول (تقسیم یکنواخت دبی)، روند کاهش CO در طبقه چهارم نسبت به طبقه اول مشخص بود، اما هنوز به حد بهینه نرسیده بود. در سناریو دوم (افزایش متوسط دبی در طبقات بالا)، غلظت CO نسبه به سناریو اول کاهش قابل ملاحظه‌ای را تجربه کرد. در سناریو سوم (افزایش شدید دبی در طبقات بالا)، اگرچه غلظت CO کاهش بیشتری نشان داد، اما به دلیل ایجاد آشفته‌گی زیاد، مقداری از دود دوباره به طبقات میانی هدایت شد. این رفتار نشان داد که افزایش دبی بالا دارای یک نقطه بهینه است و نمی‌توان دبی را بدون محدودیت افزایش داد.

میانگین زمانی نمودارهای غلظت CO در جدول ۶ نشان داد که بهترین حالت مربوط به سناریوی B بود که در آن ۵۶ درصد دبی کل به طبقات سوم و چهارم اختصاص یافت و طبقات اول و دوم سهم کمتری دریافت کردند. این توزیع، بهینه‌ترین مقدار CO را در کل سیستم ایجاد کرد و موجب شد زمان لازم برای رسیدن CO به سطح خطرناک افزایش یابد. همچنین اختلاف غلظت CO بین طبقات در این سناریو کمترین مقدار بود، که نشان‌دهنده پایداری جریان و توزیع یکنواخت‌تری از هوای جبرانی بود.

جدول ۶ - میانگین زمانی غلظت CO طبقات در سناریوهای مختلف

Table 6 – Time-averaged CO concentration of the floors in the different scenarios

Scenario	First Floor CO Concentration	Fourth Floor CO Concentration
A	3.888	61.388

B	12.861	60.167
C	39.122	48.972

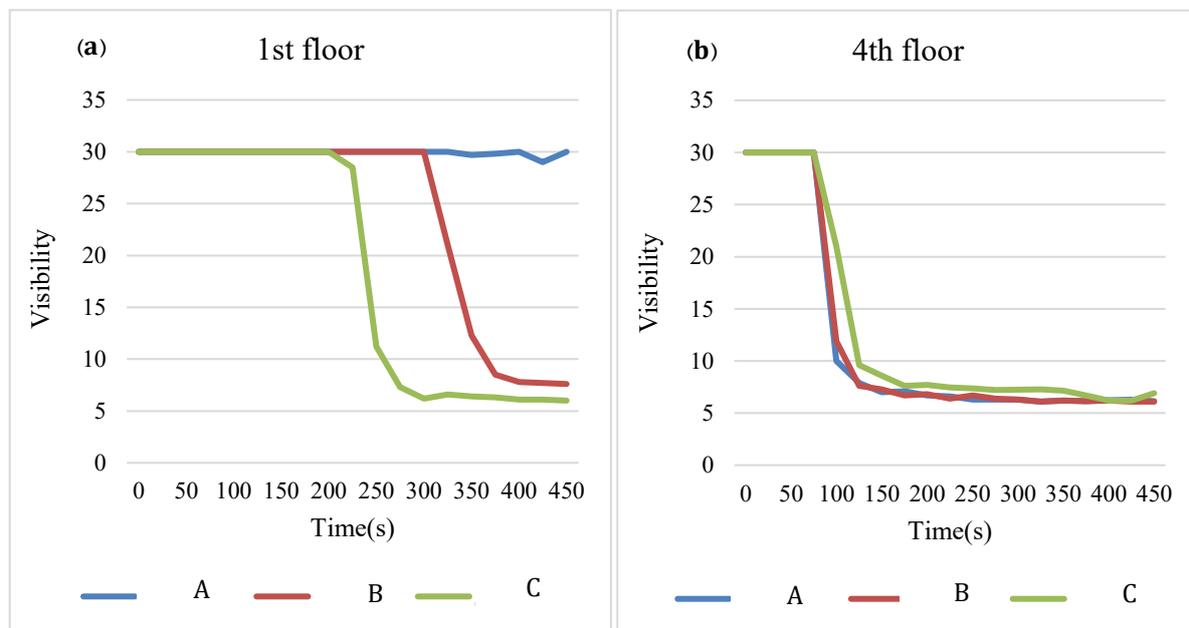
۳. تحلیل شاخص دید

شاخص دید معیار کلیدی در تحلیل ایمنی مسیرهای تخلیه است. نتایج شکل ۷ نشان داد که سناریو الف در طبقات بالا با افت شدید دید مواجه بود. با اعمال توزیع دبی بهینه در سناریو های ب و ج، دید در طبقات چهارم و سوم، مطابق جدول ۷ به مقدار قابل توجهی افزایش یافت. تحلیل روند زمانی شکل ۷ نشان داد که در مدل پایه، دید در مسیر تخلیه طبقه چهارم در مدت زمان کوتاهی به کمتر از ۱۰ متر رسید، در حالی که در الگوی بهینه این مقدار برای مدت بیشتری در محدوده قابل قبول باقی ماند.

جدول ۷- میانگین زمانی دید طبقات در سناریو های مختلف

Table 7 – Time-averaged visibility of the floors in the different scenarios

Scenario	First Floor Visibility	Fourth Floor Visibility
A	29.916	11.28
B	24.226	11.38
C	19.038	12.54



شکل ۶- دید در طول زمان در (الف) طبقه اول و (ب) طبقه چهارم در سناریو های مختلف

Figure 7 – Visibility over time at (a) the first floor and (b) the fourth floor in the different scenarios

نتایج نشان می‌دهد که رفتار دود و توزیع غلظت CO در آتریوم چندطبقه به شدت تحت تأثیر اثر دودکش و جابجایی همرفتی قائم ناشی از اختلاف دما بین لایه دود و هوای محیط است. در حالت توزیع یکنواخت دبی هوای جبرانی، نیروی شناوری غالب بوده و باعث انتقال سریع دود به طبقات بالایی و تجمع CO در این نواحی می‌شود. با افزایش سهم دبی هوای جبرانی در طبقات بالاتر، تکانه جریان ورودی در جهت مخالف حرکت دود عمل کرده و ضمن تضعیف جریان صعودی، موجب رقیق‌سازی دود و کاهش غلظت CO در ارتفاع تنفس می‌شود.

با این حال، نتایج نشان می‌دهد که افزایش بیش از حد دبی هوای جبرانی در یک طبقه خاص می‌تواند باعث ایجاد آشفته‌گی موضعی، اختلاط شدید و حتی بازگشت بخشی از دود به طبقات مجاور شود. بنابراین، عملکرد بهینه سامانه زمانی حاصل می‌شود که تعادل مناسبی بین نیروی شناوری دود و تکانه جریان هوای جبرانی برقرار شود، به گونه‌ای که بدون برهم زدن ساختار لایه‌بندی دود، بیشترین کاهش CO در مسیرهای تخلیه تأمین شود.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع یکنواخت دبی هوای جبرانی در آتریوم‌های چندطبقه نمی‌تواند پاسخگوی الگوی واقعی تجمع دود و گازهای سمی، به‌ویژه منوکسید کربن، باشد و در بسیاری از موارد منجر به افزایش خطر در طبقات بالایی می‌شود. شبیه‌سازی عددی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار FDS بیان کرد که شدت اثر دودکشی و حرکت قائم دود باعث می‌شود طبقه چهارم بیشترین میزان آلودگی را تجربه کند و در نتیجه نیاز بیشتری به دبی هوای جبرانی داشته باشند. بر اساس تحلیل دقیق غلظت CO، دما و شاخص دید، مشخص شد که اختصاص دبی هوای جبرانی به‌صورت هدفمند و متناسب با شدت آلودگی هر طبقه، عملکرد سیستم مدیریت دود را به شکل چشمگیری بهبود می‌دهد.

الگوی بهینه توزیع دبی که سناریو ب این پژوهش حاصل شد، نشان داد که تخصیص حدود ۵۵ تا ۶۰ درصد از دبی کل به طبقات سوم و چهارم می‌تواند بیشترین تأثیر را در کاهش غلظت CO و بهبود دید در مسیرهای تخلیه داشته باشد. این الگو علاوه بر کاهش سطح خطر، موجب تثبیت لایه‌بندی دود و جلوگیری از ایجاد جریان‌های آشفته‌گی ناخواسته در طبقات پایین شد. در مقابل، افزایش بیش از حد دبی در یک طبقه خاص باعث اختلال در ساختار جریان و بازگشت بخشی از دود به طبقات میانی می‌شد؛ بنابراین توزیع بهینه باید در محدوده‌ای کنترل شده انجام گیرد.

نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک رویکرد مبتنی بر غلظت CO برای تعیین نسبت دبی هوای جبرانی است، رویکردی که می‌تواند مبنای طراحی سیستم‌های هوارسانی مکانیکی در آتریوم‌ها قرار گیرد و به‌عنوان روش مکمل در کنار استانداردهای موجود مورد استفاده مهندسان قرار گیرد. از آنجا که مدل ارائه شده تنها بر ورودی‌های دیواری تکیه دارد، می‌تواند بدون نیاز به سامانه‌های پیچیده و پرهزینه، در ساختمان‌های معمولی نیز قابل اجرا باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب طراحی قابل اعتماد در پروژه‌های مدیریت دود مورد استفاده قرار گیرد و زمینه را برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی پویا و هوشمند توزیع دبی هوای جبرانی فراهم سازد.

منابع

- [1] H. Hu, H. Li, Z. Qi, J. Shi, and J. Ji, "Full-scale experiments on smoke movement in a two-story detached house with two horizontal openings at the lower-floor ceiling," *J. Build. Eng.*, vol. 91, p. 109564, 2024. doi:10.1016/j.job.2024.109564
- [2] M. Fu, R. Liu, and Y. Zhang, "Why do people make risky decisions during a fire evacuation? Study on the effect of smoke level, individual risk preference, and neighbor behavior," *Saf. Sci.*, vol. 140, p. 105245, 2021. doi:10.1016/j.ssci.2021.105245
- [3] D. A. Purser, "Effects of pre-fire age and health status on vulnerability to incapacitation and death from exposure to carbon monoxide and smoke irritants in Rosepark fire incident victims," *Fire Mater.*, vol. 41, no. 5, pp. 555–569, 2017.
- [4] J. H. Klote, J. A. Milke, P. G. Turnbull, A. Kashef, and M. J. Ferreira, "Handbook of smoke control engineering," 2012.
- [5] W. Węgrzyński and G. Krajewski, "Influence of wind on natural smoke and heat exhaust system performance in fire conditions," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 164, pp. 44–53, 2017. doi: 10.1016/j.jweia.2017.01.014
- [6] W. Lei, Y. Qi, A. Li, and S. Mei, "Effects of makeup air on atrium smoke conditions: a review," *Indoor Built Environ.*, vol. 32, no. 1, pp. 66–84, 2023.
- [7] C. Pongratz, J. A. Milke, and A. Trouve, "A CFD Study to Identify Methods to Increase Maximum Velocity of Makeup Air for Atrium Smoke Control," *ASHRAE Trans.*, vol. 122, no. 2, 2016.

- [8] A. Rafinazari and G. Hadjisophocleous, "A study of the effect of make-up air velocity on the smoke layer height with symmetric openings in atrium fires," *Fire Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 229–253, 2018.
- [9] C. Gutierrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, M. A. Burgos, and A. Viedma, "On the fluid dynamics of the make-up inlet air and the prediction of anomalous fire dynamics in a large-scale facility," *Fire Saf. J.*, vol. 51, pp. 27–41, 2012. doi: 10.1016/j.firesaf.2012.02.007
- [10] J. S. Roh, H. S. Ryou, W. H. Park, and Y. J. Jang, "CFD simulation and assessment of life safety in a subway train fire," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 447–453, 2009. doi: 10.1016/j.tust.2008.12.003
- [11] M. Krol, "Review of smoke management in atrium," *Archit. Civ. Eng. Environ.*, vol. 4, no. 3, pp. 121–127, 2011.
- [12] Y. Alarie, "Toxicity of fire smoke," *Crit. Rev. Toxicol.*, vol. 32, no. 4, pp. 259–289, 2002.
- [13] S. A. Kebriyae, M. Moghiman, and H. Niazmand, "Numerical study of the effect of ambient air temperature and relative humidity on diesel pool fire," *Fuel Combust.*, vol. 17, no. 2, pp. 57–76, 2024.
- [14] S. A. Kebriyae, M. Moghiman, and H. Niazmand, "Numerical study on the effects of ambient air temperature and relative humidity on diesel pool fire," *Fuel and Combustion*, vol. 17, no. 2, pp. 57–76, 2024, doi: 10.22034/jfnc.2024.463133.1398.
- [15] W. Lei, Z. Zhang, Z. Zheng, C. Tai, L. Zhang, and S. Zhao, "Scaled experiment and numerical study on the effect of a novel makeup air system on smoke control in atrium fires," *J. Build. Eng.*, vol. 95, p. 110237, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110237>.