



بررسی اثرات حریق یک صندلی در یک سالن سینما با استفاده از سیستم‌های تهویه جابجایی، جت برخوردی و لایه‌ای

مصطفی رمضانی، امیرمحمدجدیدی*، روح‌اله رفعی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

تهویه مطبوع

حریق

پایروسیم

کربن مونوکسید

شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

خلاصه: در این مقاله به بررسی اثرات حریق یک صندلی در سالن سینما با استفاده از سیستم‌های تهویه جابجایی، جت برخوردی و لایه‌ای پرداخته شده است. از مهم‌ترین نتایج این بررسی می‌توان گفت میان سیستم‌های تهویه جابجایی، جت برخوردی و لایه‌ای، دو سیستم تهویه جابجایی و جت برخوردی در کنترل دوده حاصل از حریق به میزان ۳۱ درصد، در گاز کربن مونو اکسید ۱۶ درصد و در گاز کربن دی اکسید ۱۱ درصد توانستند بهتر از سایر سیستم‌ها عمل کنند، اشاره کرد. غلظت گازهای سمی حاصل از حریق در هر سه سیستم در محدوده مجاز و بی خطر قرار گرفته است به این صورت که دو سیستم تهویه جابجایی و جت برخوردی ۶/۳ پی‌پی‌ام و سیستم تهویه لایه‌ای ۷/۵ پی‌پی‌ام برای گاز کربن مونو اکسید و در مورد گاز کربن دی اکسید نیز دو سیستم تهویه جابجایی و جت برخوردی ۳۳۰ پی‌پی‌ام و سیستم تهویه لایه‌ای نیز ۳۷۰ پی‌پی‌ام ثبت کرده‌اند. در کنترل حرارت خروجی از درب‌های سالن سینما، سیستم‌های تهویه جابجایی و جت برخوردی در درب شماره ۱ به میزان ۶۶/۶ درصد و در درب شماره ۲ نیز سیستم تهویه جت برخوردی ۹۶ درصد نسبت به سیستم تهویه لایه‌ای عملکرد بهتری داشته است.

۱- مقدمه

با توجه به اینکه انسان‌ها زمان زیادی را در فضاهای بسته سپری می‌کنند، این فضاها نیازمند توجه ویژه‌ای برای بررسی حریق خواهند بود. فضاهایی از جمله ساختمان‌های مسکونی، اداری یا فضاهایی برای تفریح و غیره مواردی از این قبیل هستند. در دنیای امروز توجه به ایمنی فضاهای بسته و مکان‌هایی که اجتماع تعداد زیادی از افراد را در آن‌ها شاهد هستیم یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر به حساب می‌آید. یکی از این فضاهای پرکاربرد سالن‌های نمایش و سینما هستند. این سالن‌ها از این نظر که فراهم کردن شرایط تهویه مطبوع هم‌زمان با ایجاد ایمنی در زمان حریق برای افراد حاضر در محل معمولاً دارای هزینه‌های زیادی است، ما را به سمت کاهش هزینه‌ها سوق می‌دهد. بحث هزینه و بهینه‌سازی هزینه‌های مربوط به پروژه‌های مختلف در دنیای امروز از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از وظایف مهم و اصلی سیستم‌های تهویه مطبوع زودن گرد و غبار و خارج کردن آلاینده‌های محیط داخلی می‌باشد. از طرفی انسان‌ها اکثر وقت

خود را در فضاهای بسته‌ای مانند آپارتمان‌ها و ادارات سپری می‌کنند [۱] و عدم وجود شرایط آسایش حرارتی^۱ مناسب و حضور آلاینده‌ها در فضاهای داخلی، عملکرد افراد را کاهش و تحت تأثیر قرار داده و از طرفی ناراضی‌تری آن‌ها افزایش می‌یابد [۲ و ۳].

ایجاد شرایط مطلوب زیست محیطی در این محیط‌های داخلی از این نظر که بخش زیادی از اوقات انسان در فضای داخل بناها می‌گذرد، اهمیت ویژه‌ای دارد و یکی از با اهمیت‌ترین بخش آن هم مربوط به انتخاب سیستم‌های تهویه مناسب برای ساکنین در فضاهای داخلی با توجه به نوع فعالیت این فضاهاست. از وظایف مهمی که سیستم‌های تهویه بر عهده دارند می‌توان به کنترل دما، رطوبت، سرعت حرکت و تمیزی هوای داخل اشاره کرد. از پارامترهای مهمی که تأثیر بسزایی بر احساس آسایش حرارتی و رضایت افراد از محیط داخلی دارد سیستم توزیع هوای داخلی است [۴]. نوع سیستم مورد استفاده در شرایط طراحی و نحوه قرارگیری دریچه‌های ورود و خروج هوا، تأثیر قابل توجهی بر الگوهای جریان هوا توزیعی و اختلاط

1 Thermal comfort

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: am.jadidi@semnan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



راه آهن نیشابور در سال ۸۲، برج سلمان مشهد در سال ۹۵ و ساختمان پلاسکو تهران در سال ۹۵ اشاره کرد [۷]. در عمل، با دانستن این نکته که حریق‌ها چگونه به وجود می‌آیند، چطور گسترش می‌یابند و چگونه می‌توان آن‌ها را کنترل و خاموش کرد، با طرح و برنامه‌ریزی خط مشی‌هایی می‌توان به طور جداگانه برای فراهم نمودن ایمنی از حریق به سه روش پیشگیری از حریق، نحوه مواجه شدن با حریق و کنترل حریق و اطفای آن، اقدام نمود. دود در همه حریق‌ها تولید می‌شود و مقادیر زیادی از گرد و غبار، ایلاف، بخارات و گازها همراه آن آزاد می‌شود [۸]. دود مخلوطی از فرآورده‌های فرار ناشی از سوختن ترکیبات آلی، متشکل از ذرات بسیار ریزی است که در حریق معلق می‌گردند. خطرات جانی ناشی از دود آتش‌سوزی در ساختمان‌ها، بیشتر از خطر سوختگی است. بیش از ۸۵٪ تلفات جانی آتش‌سوزی‌ها مربوط به خفگی به واسطه دود است.

اکثر گازهای حاصل از حریق آلاینده و مهم‌ترین عامل مرگ می‌باشند. کربن مونوکسید خطرناک‌ترین آلاینده است و این موضوع به علت میل ترکیب‌پذیری بالای آن با خون انسان است. هر زمان که میزان کربن مونوکسید در اکسیژن هوا زیاد شود، می‌تواند باعث بیهوشی و مرگ گردد. اما غلظت کمتر آن، باعث سردرگمی و گیجی فرد شده و او را در معرض خطرهای دیگری ناشی از حریق قرار می‌دهد. میزان مجاز و خطرناک غلظت کربن مونوکسید در محیط داخلی ۵۰ پی‌پی‌ام است [۹]. دومین گاز خطرناک تولیدی توسط حریق، کربن دی‌اکسید است، هر زمان برای احتراق کامل کربن با ترکیبات آلی مقدار اکسیژن کافی باشد، کربن دی‌اکسید به همراه مقدار زیادی حرارت آزاد می‌شود. تحقیقات و ارزیابی ریسک بهداشتی ناشی از تماس با دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد که در زمان کوتاه حداکثر مقدار قابل تحمل ۳۰۰۰۰ پی‌پی‌ام و در زمان طولانی ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام از حجم هوای محیط داخلی است و بالاتر از این مقادیر بر روی سلامتی در افراد عادی اثر خواهد داشت [۱۰].

۲- تاریخچه و مطالعات انجام شده

آبی و گان [۱۱]، با مطالعه عددی سیستم‌های توزیع و پخش هوا، پس از بررسی کارایی آنها در تهویه به این نتیجه رسیدند که سیستم جابجایی عملکرد قابل قبول‌تری در حوزه کارایی تهویه نسبت به سیستم اختلاطی دارد. آبی [۱۲] پس از بررسی و مقایسه حل عددی و تجربی توزیع هوا و کارایی آن در تهویه به این نتیجه رسید که کارایی سیستم تهویه جابجایی در توزیع گرما تقریباً دو برابر بهتر از سیستم تهویه اختلاطی است. لی و لام

آن با هوای محیط داخلی دارد. این ویژگی‌های جریان هوا همچنین تأثیر فزاینده‌ای بر پروفیل دمای داخلی و خروج ذرات آلاینده از فضای محیط داخلی دارند و می‌تواند پاسخگوی نیاز ساکنین چنین محیط‌هایی باشد [۵].

در سیستم تهویه جابجایی، هوای عرضه شده از کف وارد شده و از درجه موجود در سقف خارج می‌گردد. بر خلاف سیستم تهویه اختلاطی، این سیستم هوا را با سرعت کمتر و نیز با درجه حرارتی نزدیک به دمای محیط داخلی، توزیع می‌کند. این عملکرد موجب می‌شود تا هوای توزیعی به دلیل وجود منابع حرارتی و بر اثر انتقال حرارت همرفت به سمت بالا حرکت کرده، دمایش افزایش یابد و جای خود را به هوای سرد تازه بدهد. در تهویه جابجایی، با استفاده از نیروهای شناوری موجود در اتاق، یک جریان لایه‌ای ایجاد می‌شود [۶]. سیستم تهویه لایه‌ای، سیستم‌های توزیع هوایی که به طور معمول در جهت تأمین آسایش حرارتی در محیط‌های داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در مقایسه با این سیستم تهویه معمولاً عملکرد ضعیف‌تری دارند [۶]. سیستم تهویه جت برخوردی، سیستم تهویه جت برخوردی، هوای تازه را بر اساس اصل ورودی به صورت جت هوا به اتاق می‌رساند. دستگاه تأمین خود به صورت مجرای است که هوای تأمین شده را در ارتفاع مشخصی از کف عرضه می‌کند و خروجی هوا معمولاً در نزدیکی سقف قرار دارد. در این سیستم، یک جت هوای با تکانه زیاد به سمت پایین تخلیه می‌شود، که به زمین برخورد می‌کند و بر روی آن پخش می‌شود، بنابراین هوای تازه را به صورت یک لایه برشی بسیار نازک در امتداد کف توزیع می‌کند. این سیستم توزیع هوا جت هوا را قادر می‌سازد تا بر قدرت شناوری تولید شده از منابع گرما غلبه کند و بیشتر به مناطق کف برسد [۶]. حریق ممکن است در هر نوع ساختمان، تأسیسات یا محیطی رخ دهد.

خانه‌ها، مدرسه‌ها، اداره‌ها، کارخانه، آزمایشگاه، بیمارستان، خودرو و... همگی در معرض خطر آتش‌سوزی هستند. حریق دارای جنبه عمومی است و در هر مکان و برای هر فردی امکان رخداد آن وجود دارد و اغلب موجب خسارات مالی و جراحات جانی می‌گردد. این نکته حائز اهمیت است که حفاظت از حریق به طور کامل به عهده سازمان‌های آتش‌نشانی و یا واحدهای آتش‌نشانی نمی‌باشد و نقش سیستم‌های مورد استفاده در ساختمان‌ها را جهت کنترل حریق می‌باید در نظر گرفت. از مهم‌ترین آتش‌سوزی‌هایی که در ایران رخ داده می‌توان به آتش‌سوزی گمرک جلفا در سال ۵۵، آتش‌سوزی

- 1 Displacement ventilation
- 2 Mixing ventilation
- 3 Stratum ventilation
- 4 Impingment jet ventilation

و خروج هوا)، کاهش مواجهه افراد حاضر در محیط با این ذرات مشاهده می‌شود. همچنین نتایج برای ذرات با اندازه‌های بزرگتر نشان دادند که دو فاکتور محل منبع تولید آلاینده و جریان هوای اطراف آن منبع، فاکتورهای تاثیرگذاری در مواجهه افراد حاضر در محیط با این ذرات محسوب می‌شوند. ژانگ و یانگ [۲۲] با استفاده از یک شبیه‌سازی کامپیوتری به بررسی توزیع و ته‌نشینی آلاینده‌ها پرداختند. با استفاده از این شبیه‌سازی اثر زبری سطح و محل منبع آلاینده در یک اتاق همراه با سیستم تهویه مطبوع را بررسی کردند. دو سیستم تهویه اختلاطی و توزیع هوای زیرسطحی بررسی شد و نتایج بیان کرد که در روش تهویه اختلاطی غلظت و جابجایی ذرات، کمتر به محل منبع ذرات آلاینده وابستگی دارد. همچنین در مدل توزیع هوای زیرسطحی، محل منبع انتشار ذرات آلاینده اثر زیادی بر توزیع و خروج آلاینده‌ها خواهد داشت.

وال کوئیست و وان هیس [۲۴] به شبیه‌سازی چندین سناریوی آتش‌سوزی با وجود تهویه مکانیکی با استفاده از نرم افزار شبیه‌ساز اف‌دی‌اس^۱ پرداختند. رفتار سیستم تهویه مکانیکی، تمرکز اصلی در این پژوهش بوده است و نشان داده شده که نرم افزار مربوطه با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی پدیده‌های ناشی از فشار در سیستم تهویه، چه در ورودی و چه در خروجی می‌باشد. آتش‌سوزی در محفظه‌های مجهز به تهویه مکانیکی همچنان یکی از موضوعات اصلی برای ارزیابی ایمنی آتش در صنعت هسته‌ای است. سناریوی آتش‌سوزی در یک محفظه محصور و تهویه شده، یک خطر معمول محسوب می‌شود و در طی آن فشار ممکن است تا حدی تغییرات داشته باشد که موجب تغییر در سطح محفظه شود و از این رو ایمنی مربوط به نصب تجهیزات را با خطر مواجه کند. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار اف‌دی‌اس به صورت اتاقی کاملاً بسته و متصل به شبکه تهویه مکانیکی است. نرم افزار اف‌دی‌اس فقط با استفاده از داده‌های ورودی از آتش (به استثنای میزان تلفات جرمی ناشی از آتش)، می‌تواند فشار داخل اتاق را به درستی پیش‌بینی کند و در نتیجه اثرات آن بر روی سیستم تهویه، به عنوان مثال جریان برگشتی در شاخه ورودی در مراحل اولیه آتش‌سوزی را به خوبی نشان دهد. براهز و کاراویتا [۲۵] یک مرکز آزمایشی در مقیاس کامل در منطقه مانس بلژیک ساختند تا اثرات هر دو حالت ساختمان بدون تهویه مکانیکی و دارای تهویه مکانیکی را بر روی خطرات ناشی از آتش‌سوزی و به ویژه بر فشار ناشی از آتش‌سوزی بررسی کنند. دو نمونه مختلف تهویه مورد آزمایش قرار گرفت: یکی با تهویه مکانیکی روشن، دیگری با مجاری بسته همراه

[۱۳] با مطالعه حل عددی تاثیرات اختلاف دما مشاهده کردند که با کاهش دمای طراحی یا کاهش فاصله کف تا سقف اتاق، محدوده ظرفیت اتاق و حجم در دسترس کاهش خواهد یافت. لی و همکاران [۱۴] پس از پژوهش و بررسی نتایج تجربی و حل عددی مربوط به توزیع جریان هوا و بررسی آلاینده‌گی و انواع آلاینده‌ها دریافتند که به نظر کارایی توزیع هوای فضای داخلی با ارتفاع اتاق نسبت مستقیم دارد. تیان و همکاران [۱۵] دریافتند که غلظت ذرات موجود در کل اتاق و منطقه تنفس در زمان استفاده از سیستم تهویه لایه‌ای کمتر از ذرات زیر تشکیل شده است. در سیستم تهویه لایه‌ای غلظت فرمالدئید در ناحیه تنفس هنگامی که منبع آلاینده نزدیک به افراد حاضر در محیط قرار می‌گیرد در مقایسه با سیستم تهویه جابجایی کمتر است. تیان و همکاران [۱۶] دریافتند که با افزایش دمای هوا از ۱۹ درجه سانتیگراد به ۲۱ درجه سانتیگراد، میزان زمانی که هوای عرضه شده در محیط قابل استفاده و دارای شرایط دمایی و رطوبتی استاندارد است، از ۴۷۵ ثانیه به ۴۴۳ ثانیه تغییر می‌کند. تیان و همکاران [۱۷] به طور تجربی غلظت کربن دی‌اکسید را بررسی و اثربخشی تهویه را تعیین کردند. در این بررسی برای چهار مورد، اثر تهویه نزدیک به ۱/۵ بود.

لای و چن [۱۸] در پژوهشی با بهره‌گیری از دیدگاه لاگرانژی به بررسی انتقال و نشست هفت دسته مختلف ذرات موجود در یک اتاق پرداختند. به این نتیجه رسیدند که با ریز کردن شبکه بندی نزدیک به دیواره، نتایج خیلی دقیق‌تر می‌شود. پیرا و همکاران [۱۹] در یک مطالعه آزمایشگاهی و تجربی، چهار نوع سیستم تهویه را در یک محیط آزمایشگاهی مدل‌سازی کردند. ایده این مدل‌سازی از نمونه واقعی مربوط به یک دفتر کار اداری بود که با هدف تحلیل عملکرد آن‌ها در حذف ذرات استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که توزیع غلظت ذرات در هوای محیط داخلی با توجه اندازه ذرات و نوع سیستم تهویه متغیر خواهد بود. ژائو و ژانگ [۲۰] با استفاده از روش‌های حل عددی غلظت ذرات آیروسول هوای داخلی در اتاق‌هایی که از دو نوع سیستم تهویه جابجایی و اختلاطی بهره می‌برند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل حاکی از آن بود که با توجه به در نظر گرفتن شرایط یکسان خواص ذرات و حجم هوای عرضه شده در منطقه نمونه، تهویه جابجایی نشست ذرات و غلظت ذرات داخلی کمتری را نسبت به تهویه اختلاطی نشان داده است. ریم و نوسالک [۲۱] به بررسی عددی رابطه بین اثربخشی سیستم تهویه و میزان غلظت ذرات هوای محیط داخلی با توجه به اندازه ذرات مختلف پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که اگر ذرات با اندازه‌های کوچک در محیط وجود داشته باشند، با بهبود اثربخشی سیستم تهویه (تغییر مکان دریچه‌های ورود

جدول ۱. مقایسه عملکرد سیستمهای تهویه لایه‌ای، جابجایی و جت برخوردی [۶]

Table 1. Performance comparison of stratum ventilation, displacement ventilation impingement jet ventilation

تهویه لایه‌ای	تهویه جابجایی	تهویه جت برخوردی	شماتیک	
			مشخصات جریان هوا	
توسط حرکت هوا و شناوری حرارتی کنترل می‌شود، عمود بودن جهت حرکت هوای توزیعی و شناوری حرارتی	بر اساس ستون گرمایی، جهت یکسان حرکت هوای ورودی و ستون گرمایی	تحت تأثیر حرکت جت و شناوری حرارتی قرار دارد		
حفره کم، حرکت جریان هوا، انتشار، افت شناوری (سرمایش)، بالا رفتن شناوری (گرمایش)	پخش جریان هوا، بالا رفتن به علت شناوری	گسترش جت به دلیل حرکت متوسط و جریان رو به بالا به دلیل شناوری	مکانیزم جریان هوا	فرم فضایی
دیوار حفره دار (صرفه‌جویی در سقف کاذب)	فضای کمتر (بالا آمدن کف، مانعی برای منطقه‌ای که افراد حضور دارند است)	دیوارها، گوشه‌ها یا ستون‌ها	استفاده فضایی	
تأمین از دیوار، برگشت از دیوار، کف یا سقف	تأمین از کف و برگشت از سقف	تأمین هوا در اواسط ارتفاع منطقه اشغالی و استخراج در سطح بالا	هوای تامینی و برگشتی	تأثیرات تهویه
توزیع سرعت، دما و غلظت به صورت استوانه‌ای	طبقه بندی بر اساس دما / غلظت	قابلیت تأمین گرمایش و سرمایش فضا برای بارهای گرمایی متوسط را دارد	توزیع هوا	
اختلاف دمای کم بین سر و پا، کشش ضعیف نزدیک یا بالاتر از دما خنثی	اختلاف دما زیاد بین سر و پا، درفت قوی	در منطقه اشغال شده طبقه-بندی دمایی پایین تری از تهویه جابجایی اما بالاتر از تهویه اختلاطی دارد	آسایش حرارتی	

حتی در دقایق اول آتش‌سوزی در زیر سقف خمیده این خطر تماشاگران را بیشتر تهدید می‌کند. یک مزیت قابل توجه شبیه‌سازی رایانه‌ای آتش، ارزیابی خطرات ایمنی و توانایی آن در تغییر پارامترهای سناریوهای مورد آزمایش با توجه به نیاز کاربر است.

با توجه به پژوهش‌های اخیر و در نظر گرفتن اهمیت موضوع ایمنی در برابر حریق و همچنین مبحث انرژی که هر روز به اهمیت آن بیش از پیش افزوده می‌شود، کمبود پژوهشی در راستای بهینه‌سازی کاربری سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان‌ها خصوصاً در کاربری‌های خاصی مانند سینما و توجه به این نکته که می‌توان از پتانسیل این سیستم‌های تهویه در جهت کمک به کنترل حریق، محصولات حریق و نیز کمک به فراهم شدن زمان بیشتری برای فرار افراد حاضر در محیط، و از طرف دیگر بهینه‌سازی مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به ساختمانها که با افزایش جمعیت در کشور در حال توسعه‌ای مانند ایران، نیاز به مدیریت بسیار خوب هزینه و انرژی حس شده است. عملاً در پژوهش‌های اخیر به بررسی ساختمان‌های مسکونی، تونل‌ها و محیط‌های صنعتی پرداخته شده اما در مورد محیط‌هایی شبیه به سالن سینما و تئاتر توجهی صورت نگرفته است و همچنین در مورد میزان غلظت گازهای سمی حاصل از حریق در این محیط‌ها که می‌توانند به مرگ افراد منجر شوند توجهی نشده است. در پژوهش حاضر سعی شد تا با استفاده از فرآیند شبیه‌سازی عددی نتایج مفیدی برای پرکردن این کمبود بدست آید.

۳- الگوسازی نظری

۳-۱- معادلات حاکم

معادله بقای جرم کلی با استفاده از قانون بقای جرم برای یک المان دیفرانسیلی از سیال، بصورت معادله (۱) بدست می‌آید [۲۹].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b \quad (1)$$

بر اساس قانون فیک در یک مخلوط دوجزئی، برای شار جرمی گونه ام رابطه (۲) بدست خواهد آمد [۳۰].

$$\dot{m}_\alpha = Y_\alpha \dot{m}_{tot} - \rho D_{\alpha b} \nabla Y_\alpha \quad (2)$$

با تهویه مکانیکی خاموش. نتایج برای پارامترهایی مثل فشار گاز، تلفات جرمی، دمای گاز، میزان جریان حجمی در مجاری و برای برخی آزمایشات نیز غلظت‌های اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و مونوکسیدکربن نیز اندازه‌گیری شدند. تغییرات فشار از برای محفظه بدون تهویه مکانیکی (مجاری بسته) مقادیری بیشتری نسبت به حالتی که تهویه مکانیکی وجود دارد، مشاهده شد و نشان داد که تهویه مکانیکی برای جلوگیری از افزایش فشار داخل اتاق کافی نیست. سرنشینان به دلیل عدم باز نشدن درب‌های بازشونده به دلیل فشار ناشی از آتش‌سوزی، ممکن است در طی مدت چند دقیقه موفق به فرار نشوند.

یان و جیان [۲۶] ابعاد اتاق آزمایش به ترتیب ۳/۶۶ متر طول، ۲/۴۴ متر عرض و ۲/۸ متر ارتفاع است. ساخت اتاق آزمایش طبق فرآیند ساختی که در مورد خانه‌های چوبی سبک واقع در آمریکای شمالی کاربرد فراوان دارد، بوده است. حریق برای این مدل یک قفسه چوبی در نظر گرفته می‌شود و علت این انتخاب هم سهولت احتراق پایداری آن می‌باشد. کنترل نرخ آزادسازی حرارت به راحتی با تغییر پارامترهای حریق مربوط به محفظه چوبی امکان‌پذیر است. بنابراین می‌توان آتش‌سوزی قفسه چوبی را به عنوان یک منبع آزادسازی حرارت در نظر گرفت. آزمایش با ایجاد حریق شروع شد و دمای داخل به مرور افزایش یافت و شیشه‌ها و پنجره‌ها نیز ۹ دقیقه بعد از شروع شکستند. در ادامه تغییرات قابل توجهی در شکل درب‌های پلاستیکی و چهارچوب پنجره‌ها مشاهده شد. بعد از شروع حریق در طی ۴۰ دقیقه از میزان حرارت آزاد شده حریق کم شد و کل چوب‌ها سوختند. کل زمان فرآیند شبیه‌سازی ۳۶۰۰ ثانیه معادل ۱ ساعت بود. بعد از سپری شدن ۱۲۰۰ ثانیه از شروع شبیه‌سازی، حریق شدت پیدا کرده و در ۲۰۰۰ ثانیه بعد از شروع آتش‌سوزی، حداکثر حریق مشاهده شد.

لوکاس [۲۷] در مقاله‌ای بیان می‌کند که، نتایج شبیه‌سازی یک سناریوی آتش‌سوزی سینما نشان می‌دهد که امدادی پتانسیل زیادی را برای شبیه‌سازی آتش و پخش دود در هندسه‌های پیچیده دارد. از نتایج این شبیه‌سازی این بود که خطرناک‌ترین مکان‌های سالن سینما در زمان حریق، بالاترین ردیف صندلی‌ها در دو طرف سالن سینما و زیر سقف منحنی شکل است. در مقاله‌ای دیگر گالاسا و همکاران [۲۸] بیان کردند که پایروسیم پتانسیل زیادی برای مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی و پیاده‌سازی آن‌ها برای سناریوهای آتش و دود و ارزیابی خطرات ایمنی دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در آتش‌سوزی بیشترین خطر در سالن سینما در قسمت‌های عقبی و سمت چپ آن وجود خواهد داشت.

$$S \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -[\kappa(x, \lambda) + \sigma_s(x, \lambda)] I_\lambda(x, s) + B(x, s) + \frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s^*) I_\lambda(x, s^*) d s^* \quad (۶)$$

که در آن $I_\lambda(x, s)$ شدت تشعشع در طول موج λ می‌باشد. S بردار جهت شدت تشعشع، $\kappa(x, \lambda)$ و $\sigma_s(x, \lambda)$ به ترتیب ضرایب جذب و انعکاس و $B(x, s)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی است. ترم انتگرالی موجود در معادله (۶) نیز بیانگر انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر می‌باشد.

معادله حالت گاز ایده آل برای جریان‌هایی با عدد ماخ پایین به صورت معادله (۷) در نظر گرفته می‌شود [۲۹].

$$\bar{p} = \rho RT \sum_{\alpha} \frac{Y_{\alpha}}{W_{\alpha}} \quad (۷)$$

در این معادله \bar{p} معادل فشار گاز، Y_{α} کسر حجمی یک گونه از گاز و W_{α} وزن مولکولی هر گونه موجود گاز می‌باشد.

۳-۲- شرط مرزی سرعت

برای جریان‌ات نزدیکی دیواره‌ها، اثرگذاری دیوار در نتایج حل عددی می‌تواند قابل توجه باشد. از آن جایی که نوسانات اغتشاشی جریان سیال در مجاورت دیواره به سمت صفر میل می‌کند، و می‌توان انتظار این نکته که لزجت گردابه‌ای در این ناحیه کاهش یابد، را هم داشت. استفاده از تابع دیواره^۱ برای جریان‌ات مغشوش حاصل از حریق در مجاورت دیواره، یکی از راه‌های افزایش دقت محاسبات است. تابع دیواره می‌تواند نیاز به ریزکردن شبکه محاسباتی یا مدل‌های سرعت پایین در مجاور دیواره‌ها را کاهش دهد [۳۲] که در رابطه (۸)، مقدار $\alpha = 11/8$ می‌باشد.

$$u^+ = z^+; z^+ \leq \alpha$$

$$u^+ = A(z^+)^B; z^+ > \alpha \quad (۸)$$

در معادله (۲)، $D_{\alpha b}$ ضریب پخش بین دو ذره، Y_{α} کسر حجمی، ρ چگالی، m_{α}^* نرخ تغییر جرم بر واحد سطح مربوط به ذره α و m_{tot}^* نرخ تغییر جرم کلی بر واحد سطح می‌باشند. با این فرض که قانون فیک در مخلوط‌های چند جزئی نیز می‌تواند به درستی عمل کند و همچنین با صرف‌نظر کردن از دیگر مکانیزم‌های پخش مولکولی، فرم کلی معادله پایستگی جرم گونه‌ها به صورت معادله (۳) نوشته خواهد شد [۲۹].

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\alpha}) + \nabla \cdot (\rho Y_{\alpha} \vec{u}) = \nabla \cdot (\rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha}) + \dot{m}_{\alpha}^* \quad (۳)$$

نرخ مصرف یا تولید گونه ام بر واحد حجم است. از رابطه (۳) برای تعیین کسر حجمی گونه‌های مختلف موجود در میدان جریان استفاده می‌شود [۳۱].

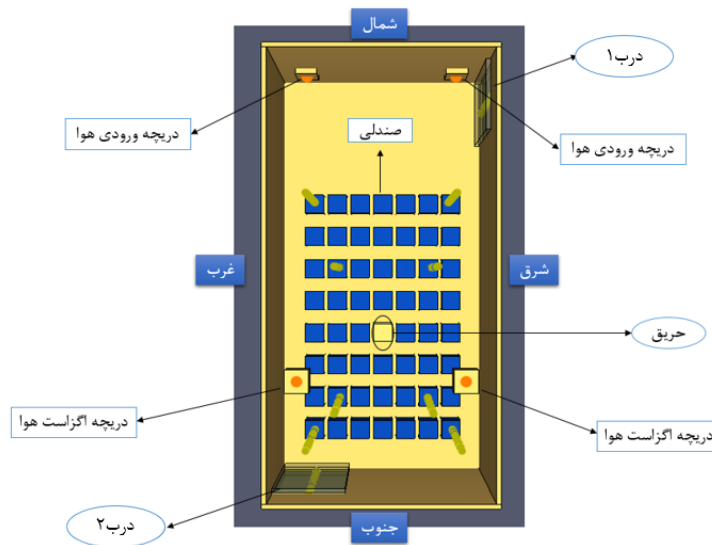
با بهره‌گیری از قانون دوم نیوتن برای یک المان دیفرانسیلی سیال، معادله پایستگی اندازه حرکت به صورت معادله (۴) بدست می‌آید. که در آن τ_{ij} تانسور تنش برای سیالات نیوتنی است.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) + \nabla P = \rho g + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (۴)$$

با استفاده از قانون اول ترمودینامیک برای یک المان دیفرانسیلی سیال، معادلات پایستگی انرژی بر اساس آنتالپی محسوس، به صورت معادله (۵) بدست می‌آید [۲۹]. h_s آنتالپی محسوس سیال که تابعی از دما است و ε نیز نمایانگر ترم اضمحلال در معادله انرژی خواهد بود. \dot{q}^* میزان گرمای آزاد شده در واحد حجم از یک واکنش شیمیایی و \dot{q}^* نیز شار گرمایی حاصل از انتقال حرارت هدایتی و تشعشعی را نشان می‌دهند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \vec{u}) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}^* - \nabla \cdot \dot{q}^* + \varepsilon \quad (۵)$$

انتقال حرارت تشعشعی در نرم افزار افدی‌اس به صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می‌گردد. معادله انتقال تشعشعی برای محیطی که شامل جذب، نشر و انعکاس تشعشع است، به صورت معادله (۶) نوشته می‌شود [۲۹].



شکل ۱. موقعیت سالن سینما در مجتمع فرهنگی

Fig. 1. Location of cinema hall in the cultural complex

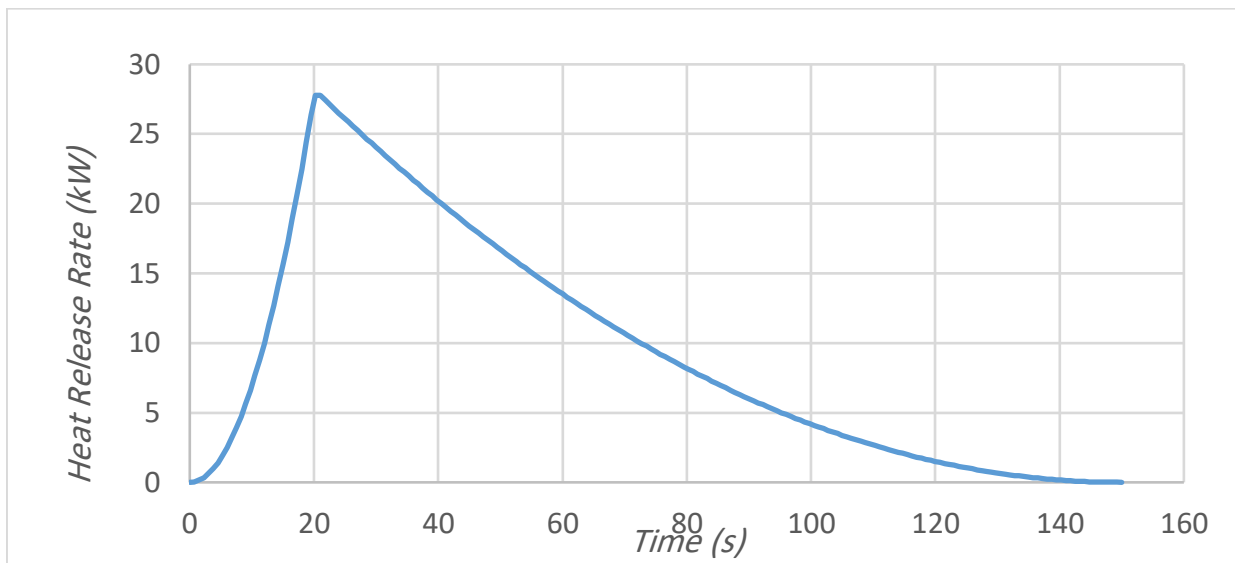
۳-۴- طرح مسئله و هندسه حل

از بررسی و پژوهش‌های پیشین کمبودی در زمینه بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع برای کمک به کنترل حریق مشاهده شد. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی سیستم‌های تهویه جابجایی، لایه‌ای و جت برخوردی، به بررسی اثرات حریق یک صندلی در یک اتاق در حضور هر کدام از این سیستم‌ها پرداخته شده است. مطالعه مربوط به پژوهش حاضر راجع به سالن سینمایی در مجتمع فرهنگی واقع در شهرستان تربت حیدریه و این سالن به ابعاد $9/8 \times 5 \times 3$ متر (ارتفاع \times عرض \times طول) است. دیوارها از آجر، ماسه و سیمان، گچ و رنگ تشکیل و دو درب یکی در دیوار شرقی و دیگری در دیوار جنوبی هر کدام به ابعاد $0/45 \times 2/4$ متر (ارتفاع \times عرض)، تعبیه شده‌اند. تعداد ۵۶ عدد صندلی به ابعاد $0/45 \times 0/45 \times 0/5$ متر (ارتفاع \times عرض \times طول)، به صورت مکعب مستطیل در این اتاق برای نشستن افراد وجود دارد. سیستم تهویه انتخاب شده در مقیاس واقعی این سینما از نوع سیستم تهویه جابجایی است که دو دریچه عرضه هوای تازه در دیوار شمالی و دو دریچه اگزاست هوا نیز در سقف تعبیه و اندازه هر کدام از دریچه‌ها $0/36 \times 0/48$ متر (طول \times عرض)، معادل 14×18 اینچ انتخاب شده است. تعداد سلول محاسباتی 2020000 با توجه به اینکه استقلال از شبکه محاسباتی را ایجاد کرده و زمان 170 ثانیه نیز با توجه به اینکه استقلال از زمان حل را شامل شده است، برای شبیه‌سازی و استفاده در نرم‌افزار انتخاب شدند.

۳-۳- روش حل و گسسته سازی معادلات

روش حل معادلات در نرم‌افزار پایروسیم، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ است. در این روش از شبکه‌ای (یا فیلتری) استفاده می‌گردد که می‌تواند گردابه‌های بزرگ در جریان را حل کند اما ناتوان در حل مستقیم گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه فیلتر است. برای در نظر گرفتن تعاملات ما بین مقیاس‌های کوچک و بزرگ، نیاز به تعریف مدل‌های زیر شبکه وجود دارد. در این روش برای مدل‌سازی گردابه‌های کوچک‌تر از اندازه فیلتر، از روش اسماکورینسکی استفاده شده خواهد شد. با بهره‌گیری از روش اختلاف محدود با دقت مرتبه دوم، نرم‌افزار پایروسیم قادر به حل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی را در طول زمان خواهد بود. متغیرها در طول زمان با استفاده از روش صریح رانگ-کوتای^۲ مرتبه دوم به صورت پیش‌بینی و اصلاح^۳، تجدید می‌گردند. تمام عبارات‌های جابجایی در مرحله پیش‌بینی به روش بالا دستی^۴ و در مرحله اصلاح به روش پایین‌دستی^۵ و عبارات‌های نفوذ در هر دو مرحله به صورت مرکزی گسسته‌سازی خواهند شد [۲۹].

- 1 Large eddy simulation
- 2 Runge-Kutta
- 3 Predictor-corrector
- 4 Upwind
- 5 Downwind



شکل ۲. نرخ آزادسازی حرارت بر حسب زمان برای صندلی سالنی ۲ [۳۴]

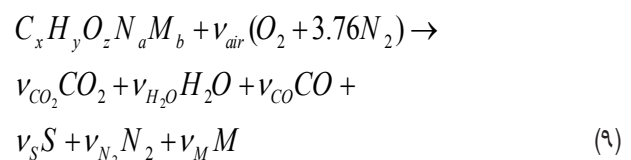
Fig. 2. Heat release versus time for lounge chair type 2

حرارت بر حسب زمان، برای اجسام مختلفی که در ساختمان‌ها ممکن است وجود داشته باشند و آتش بگیرند را با نتایج تجربی به صورت نمودار ارائه کردند. شرکت توسعه دهنده نرم افزار پايروسیم این اطلاعات را به صورت داده‌هایی در دسترس کاربران قرار دادند به این صورت که در یک فایل اکسل این مقادیر قابل دسترسی هستند و می‌توان با توجه به نیاز هر کدام از اجسام را انتخاب کرد. شبیه‌ترین مورد برای شبیه‌سازی حریق یک صندلی در واقعیت، صندلی سالنی ۲ از مقاله کیم و دیوید است. این صندلی دارای مشخصاتی از جمله، پایه‌های فلزی و الیافی از جنس فیبر و به صورت قالب یک تکه ساخته شده است. شکل ۲ نمودار نرخ آزادسازی حرارت حریق صندلی سالنی ۲ بر حسب زمان را نشان می‌دهد. در جدول ۳ نیز ضرایب استوکیومتری مربوط به معادله (۹) که واکنش حریق مربوط به صندلی هستند آورده شده‌اند.

لازم بذکر است که ضرایب ۷ در معادله (۹) با توجه به مدل احتراقی کسر مخلوط در طی فرآیند احتراق، تغییر خواهند کرد. برای اطلاعات بیشتر در مورد مدل کسر مخلوط به مرجع [۳۹] مراجعه شود.

۳-۵- تعریف واکنش برای ایجاد حریق

این جزئیات از دو بخش تشکیل می‌شود، در بخش اول از استاندارد مربوط به حفاظت ساختمان‌های نیوزلند در برابر حریق [۳۳]، اطلاعاتی راجع به طراحی مشخصات حریق قبل از شعله‌ور شدن آتش در ساختمان‌هایی با ارتفاع سقف کمتر از ۳ متر استخراج شدند. با داشتن این مقادیر، می‌توان ضرایب استوکیومتری معادله (۹) را بدست آورد. در معادله (۹) منظور از M سایر محصولاتی که ممکن است در زمان احتراق تولید شوند، می‌باشد.



اطلاعات مربوط به نمودار آزادسازی حریق از مقاله کیم و دیوید [۳۴] استخراج و در نرم افزار پايروسیم وارد شدند. کیم و دیوید نرخ آزادسازی

جدول ۲. مشخصات مواد بکار برده شده در صندلی [۳۴]

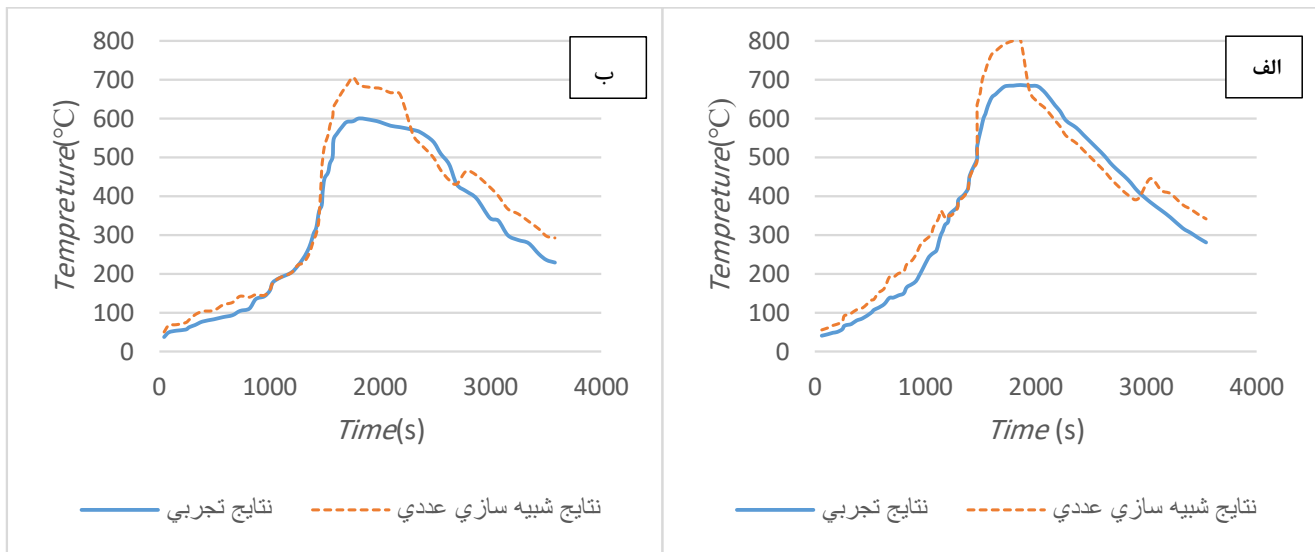
Table 2. The material properties of lounge chair type 2

چگالی (kg/m ^۳)	هدایت حرارتی (W/m.K)	گرمای ویژه (kJ/kg.K)	گرمای احتراق (kJ/kg)	ماده
۷۹۰۰	۸۰	۰/۴۵	-	پایه آهنی
۴۰	۰/۱۵	۱	۳۰۰۰۰	الیاف اسفنجی

جدول ۳. ضرایب مربوط به واکنش حریق در معادله (۹) [۳۳]

Table 3. Coefficients related to fire reaction in Eq. (9)

حداکثر نرخ آزادسازی حرارت حریق	ضرایب معادله (۹)	کسر حجمی	نوع ساختمان
۲۰۰۰۰	$x=1$ $y=2/2$ $z=0/62$ $a=0$ $b=0$ $v_{air}=1/62$ $v_{CO_2}=0/83$ $v_{H_2O}=1/1$ $v_{CO}=0/35$ $v_S=0/14$ $v_{N_2}=6/1$ $v_M=0$	$Y_{soot}=0/07$ $Y_{CO}=0/04$ $Y_{CO_2}=1/5$ $Y_{H_2O}=0/82$	تمام ساختمان‌هایی با ارتفاع سقف کمتر از ۳ متر



شکل ۳. نمودار مقایسه شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی [۲۶]، الف) دمای داخلی در دیوار سمت راست ب) دمای داخلی در سقف

Fig. 3. Comparison diagram of numerical simulation and experimental results [26], a) Internal temperature in the right wall b) Internal temperature in the ceiling

در سیستم‌های تهویه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، حجم فن‌های هوادهی و خروجی هوا در همگی مراحل یکسان در نظر گرفته شده‌اند.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- اعتبارسنجی پژوهش

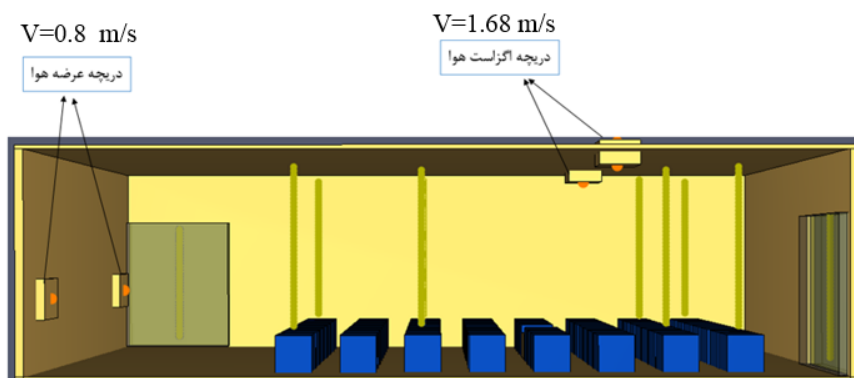
در این بخش به اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار پاپروسیم با استفاده شبیه‌سازی مجدد و مقایسه با نتایج تجربی پرداخته می‌شود. اعتبارسنجی این پژوهش با استفاده از مقاله‌ای از یان و جیان [۲۶] در مورد تست و تحلیل شبیه‌سازی حریق در ساختمان‌های ساخته شده از چوب بامبو مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی اتاقک در نرم‌افزار پاپروسیم انجام شده است. به منظور صحت سنجی، در این شبیه‌سازی نتایج تجربی دمای داخلی دیوار سمت راست و سقف سازه با نتایج عددی مقایسه شدند که در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود در اکثر نقاط انطباق خوبی مابین نتایج شبیه‌سازی عددی حاضر و نتایج تجربی مشاهده می‌شود.

۳-۶- انتخاب سیستم تهویه

انتخاب سیستم‌های تهویه مورد استفاده در تحقیق حاضر برای بررسی نتایج حاصل از تأثیر آن‌ها بر روی حریق، با توجه به تحقیقات انجام شده اخیر و همچنین شرایط مناسب کاربری سیستم‌هایی که قابلیت استفاده در فضاهایی همچون سینما را دارند، سه سیستم تهویه شامل سیستم تهویه جابجایی، سیستم تهویه لایه‌ای و سیستم تهویه جت برخوردی انتخاب شدند. حجم فن خروجی هوای آلاینده برای سالن سینما با توجه به حجم اتاق و تعداد دفعات تعویض هوا در این سالن یا با توجه به میزان هوای مورد نیاز برای هر فرد با توجه به مرجع [۳۵] مشخص شدند.

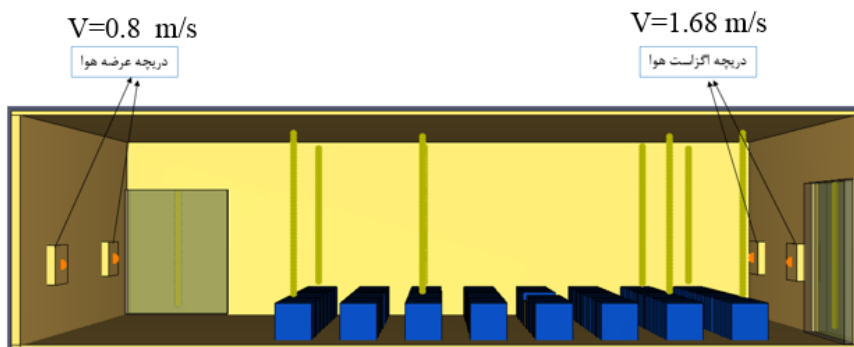
حجم هوای مورد نیاز برای فضای سینمایی با تعداد ۵۶ نفر حاضر در سالن ۹۰۰ سی اف ام^۱ انتخاب شده است و در مورد انتخاب فن هوادهی نیز در اتاقی که دود وجود داشته باشد باید به میزان ۷۵ درصد حجم هوای خروجی شده [۳۶] در نظر گرفته شود. به این معنی که فن هوادهی ۷۰۰ سی اف ام انتخاب شده است. با توجه به این نکته که صرفاً حرکت ذرات دود

1 Cubic foot per minute



شکل ۴. محل قرار گیری دریچه‌های عرضه و خروجی هوا در سیستم تهویه جابجایی

Fig. 4. Location of air supply and outlet vents in the displacement ventilation system



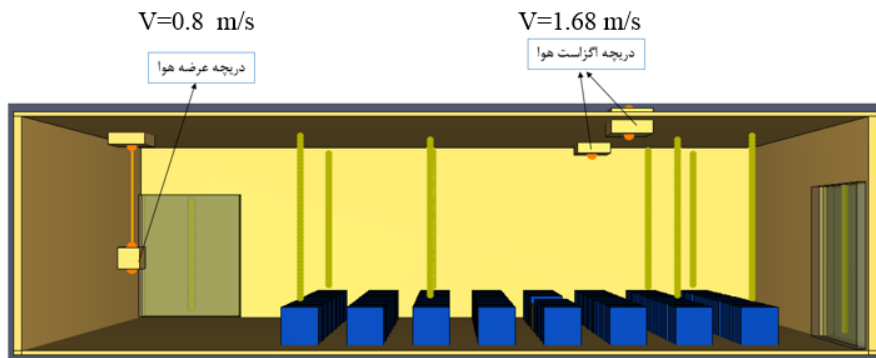
شکل ۵. محل قرار گیری دریچه‌های عرضه و خروجی هوا در سیستم تهویه لایه‌ای

Fig. 5. Location of air supply and outlet vents in the stratum ventilation system

۴-۲- موقعیت سیستم‌های تهویه و حریق

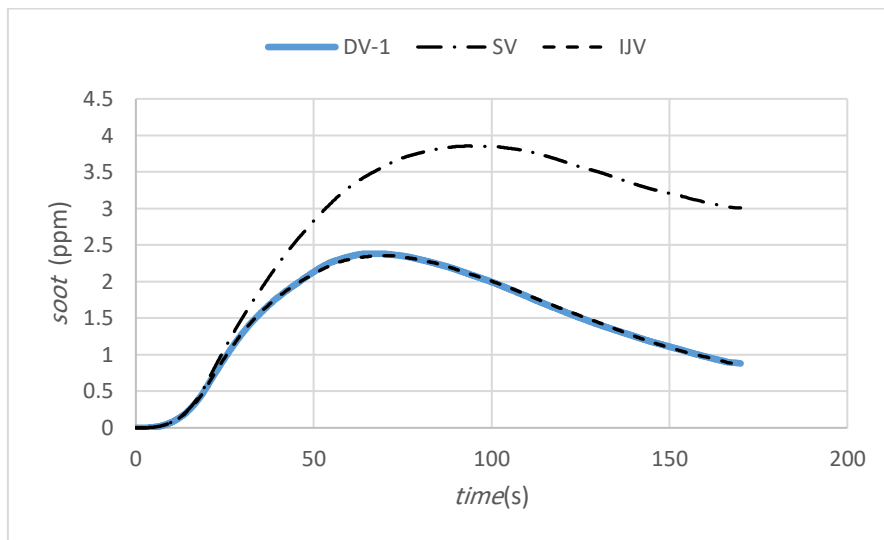
سیستم تهویه جابجایی دقیقاً با نمونه واقعی مورد استفاده در مجتمع فرهنگی و سینما برابر است. برای بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه، به عنوان اولین شبیه‌سازی از این سیستم استفاده شد (به شکل ۴ رجوع شود). سیستم تهویه لایه‌ای، این سیستم شباهت زیادی با سیستم تهویه جابجایی دارد، با این تفاوت که دریچه‌های خروجی هوا دقیقاً رو به روی دریچه‌های عرضه هوا قرار می‌گیرند (به شکل ۵ رجوع شود). در سیستم تهویه جت برخوردی، هوا به صورت جت‌های سیال از دریچه عرضه هوا خارج شده و در سطح زمین جاری می‌شود. دریچه‌های خروجی هوا نیز در سقف و دقیقاً مشابه با سیستم تهویه جابجایی نوع اول تعبیه شده‌اند (به شکل ۶ رجوع شود).

مطالعه حاضر به بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه در یک محیط عمومی در زمان وجود حریق پرداخته است. بر اساس نتایج مقاله یانگ و همکاران [۶] مبنای انتخاب سیستم‌های تهویه نحوه عملکرد آن‌ها در کنترل آلاینده‌ها، کاربرد آن‌ها در محیط‌های عمومی، عملکرد آن‌ها در کنترل هدر رفت انرژی (ذخیره‌سازی انرژی زمانی که سیستم تهویه در حال انجام فرایند عادی تهویه در محیط داخلی هستند) و همچنین میزان هزینه‌های اولیه برای اجرای آن‌ها و هزینه‌های ثانویه (هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری) بوده است. در نهایت سه سیستم تهویه بر اساس این شرایط انتخاب شدند. عملکرد سیستم‌های تهویه جابجایی، سیستم تهویه لایه‌ای و سیستم تهویه جت برخوردی در نظر گرفته و نتایج بررسی شدند.



شکل ۶. محل قرار گیری دریچه‌های عرضه و خروجی هوا در سیستم تهویه جت برخوردی

Fig. 6. Location of air supply and outlet vents in the impingement jet ventilation system



شکل ۷. مقایسه غلظت دوده در سیستم‌های تهویه مختلف

Fig. 7. Comparison of soot concentration in different ventilation systems

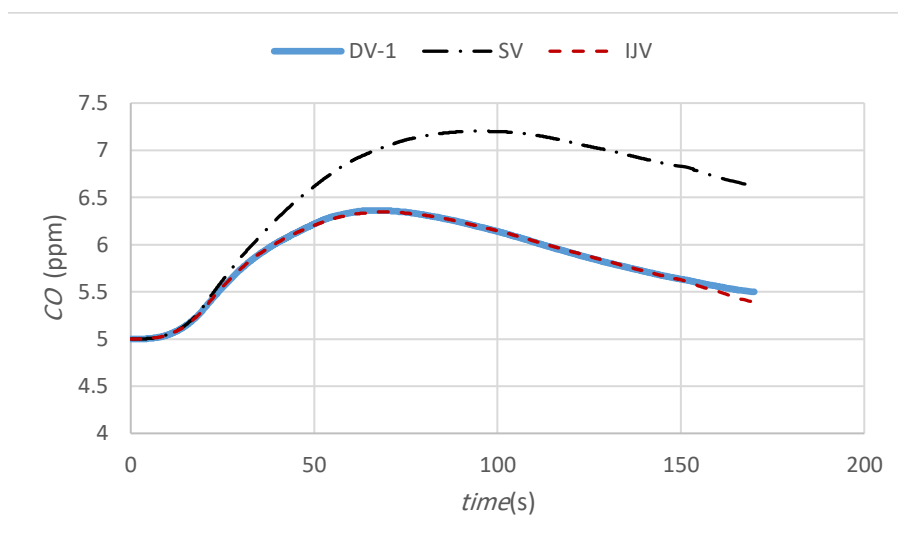
گرفته‌اند. این روند از آن جهت که حریق تا ۴۰ ثانیه پس از شروع فرایند به حداکثر مقدار آزادسازی حرارت خود می‌رسد، مشخصاً باید تا ۴۰ ثانیه افزایش میزان دوده مشاهده شود و از طرفی چون سیستم‌های تهویه در حال کار برای خارج‌سازی دود هستند، هر چه زمانی که پیک نمودار اتفاق می‌افتد به زمان ۴۰ ثانیه نزدیک‌تر باشد عملکرد بهتری را شاهد خواهیم بود و هر چه این زمان بیشتر شود سیستم تهویه در خارج‌سازی دود عملکرد ضعیف‌تری را از خود نشان می‌دهد. با بررسی نتایج حاصل از مقایسه عملکرد سه سیستم

۳-۴- عملکرد سیستم‌های تهویه در کنترل دوده و گازهای حاصل از حریق در این بخش به بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه در کنترل و خارج‌سازی دود و محصولات حاصل از حریق و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود. شکل ۷ مقایسه دوده حاصل از حریق بر حسب زمان را در سیستم‌های تهویه مختلف برای کل حجم اتاق نمایش می‌دهد. در این نمودار همانطور که دیده می‌شود در ابتدا همگی دارای روندی صعودی تا نقطه پیک غلظت و سپس روند نزولی تا لحظه ثابت شدن غلظت به خود

جدول ۴. مقایسه پارامترهای نمودار دوده در سیستم‌های تهویه مختلف

Table 4. Comparison of soot diagram parameters in different ventilation systems

نوع سیستم تهویه	زمان رسیدن به پیک غلظت (ثانیه)	حداکثر غلظت (پی پی ام)	زمان رسیدن به پایداری غلظت (ثانیه)	غلظت پایداری سیستم تهویه (پی پی ام)
جت برخوردی	۶۷	۲/۳۵	۱۶۷	۱
جابجایی	۶۸	۲/۳۵	۱۶۶	۱
لایه‌ای	۹۴	۳/۷۵	۱۶۸	۳



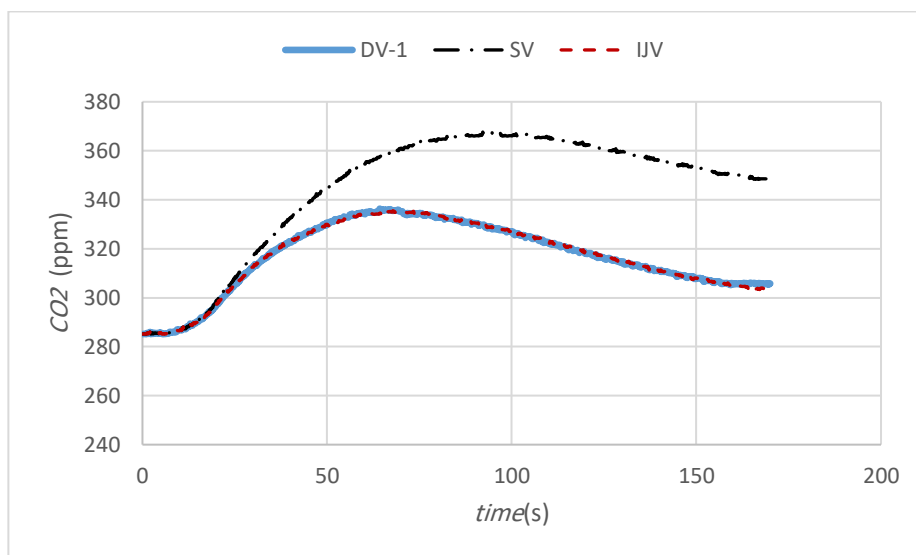
شکل ۸. مقایسه غلظت گاز کربن مونو اکسید در سیستم‌های تهویه مختلف

Fig. 8. Comparison of carbon monoxide concentration in different ventilation systems

جدول ۴: مقادیر مربوط به زمان پیک و پایداری غلظت دوده در سیستم‌های تهویه مختلف آورده شده‌اند.

با توجه به مقادیر جدول ۴، دو سیستم تهویه جابجایی و تهویه جت برخوردی ۳۷/۳ درصد بهتر از سیستم تهویه لایه‌ای در کنترل دوده حاصل از حریق عمل کرده‌اند. در نهایت با توجه به زمان عملکرد بهترین کارایی مربوط به سیستم تهویه جت برخوردی بوده است. شکل‌های ۸ و ۹، به ترتیب غلظت کربن مونو اکسید و کربن دی اکسید را بر حسب زمان در سیستم‌های تهویه مختلف برای کل حجم اتاق نشان می‌دهند. همانند نمودار دوده حاصل از حریق، این نمودارها نیز در ابتدا تا نقطه پیک غلظت گازها دارای روند

تهویه در مورد کنترل میزان دوده در شکل ۷، به ترتیب سیستم تهویه جت برخوردی در ۶۷ ثانیه، سیستم تهویه جابجایی در ۶۸ ثانیه و سیستم تهویه لایه‌ای در ۹۴ ثانیه پس از حریق توانستند بهترین عملکرد را در کنترل میزان دوده در طی زمان شبیه‌سازی داشته باشند. در مورد پایدار شدن میزان غلظت دوده در شکل ۷، به ترتیب سریع‌ترین پایداری مربوط به سیستم تهویه جابجایی با ۱۶۶ ثانیه، سیستم تهویه جت برخوردی با ۱۶۷ ثانیه و سیستم تهویه لایه‌ای با ۱۶۷ ثانیه بعد از شروع حریق بوده است. نتایج ارائه شده در این قسمت همگی به صورت میانگین‌گیری حجمی در کل فضای اتاق اندازه‌گیری شده‌اند.



شکل ۹. مقایسه غلظت گاز کربن دی اکسید در سیستم‌های تهویه مختلف

Fig. 9. Comparison of carbon dioxide concentration in different ventilation systems

کمتری موفق به کنترل گاز کربن مونو اکسید شده، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. با توجه به جدول ۵ دو سیستم تهویه جابجایی و جت برخوردی ۲۱/۷ درصد از سیستم تهویه لایه‌ای در کنترل غلظت گاز کربن دی اکسید بهتر عمل کرده‌اند. غلظت مجاز گاز کربن مونو اکسید در هوای محیط داخلی ۵۰ پی پی ام است که مدت زمان کوتاه باعث مرگ افراد می‌شود [۹]، و میزان غلظت مجاز گاز کربن دی اکسید در هوای محیط داخلی برای یک مدت طولانی به میزان ۱۰۰۰۰ پی پی ام است که می‌تواند باعث مرگ افراد شود [۱۰]. با توجه به مقادیر جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌شود که در این حجم از حریق غلظت گازهای سمی موجود در محیط در حدی نیست که بتواند به افراد حاضر در محل آسیب برساند. اما این نکته حائز اهمیت است که سیستم‌های تهویه در خارج‌سازی این آلاینده‌ها بسیار خوب عمل کرده و توانستند از ازدیاد آلاینده‌ها جلوگیری کنند. در نهایت با توجه به شکل‌های ۷، ۸ و ۹ و طرز کار سیستم‌های تهویه می‌توان دلایل تأثیر آن‌ها بر روی کنترل محصولات حریق را به تفکیک انجام شرح داد. در یک سیستم تهویه جت برخوردی، یک جت هوای با تکانه زیاد به سمت پایین تخلیه می‌شود، که به زمین برخورد کرده و بر روی سطح آن پخش می‌گردد،

صعودی و سپس به صورت نزولی کاهش پیدا می‌کنند تا به پایداری برسند. از آنجایی که کربن مونو اکسید صرفاً در زمان احتراق ناقص سوخت بوجود می‌آید، در شکل ۸ مقدار غلظت این گاز از ۵ پی پی ام شروع شده و با شروع احتراق افزایش می‌یابد تا مقدار حداکثر خود در محیط اتاق برسد پس از کمتر شدن نرخ سوزش حریق دیده می‌شود که غلظت کربن مونو اکسید هم رو به کاهش می‌رود و در نهایت به مقدار ثابتی در هوای محیط می‌رسد. اما گاز کربن دی اکسید که همواره در هوای محیط اطراف وجود دارد تقریباً از مقدار ۲۸۰ پی پی ام شروع شده و بعد از شروع حریق با افزایش نرخ سوزش حریق تولید و غلظت این گاز در محیط شروع به افزایش کرده، به نقطه حداکثر خود رسیده و پس از طی روند نزولی در نهایت به مقدار ثابتی رسیده است. در جداول ۵ و ۶ مقادیر مربوط به زمان پیک و پایداری غلظت گازهای مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن در سیستم‌های تهویه مختلف آورده شده‌اند.

با توجه به جدول ۵، سیستم تهویه جابجایی و سیستم تهویه جت برخوردی ۴۰/۹ درصد از سیستم تهویه لایه‌ای در کنترل میزان کربن مونوکسید بهتر عمل کردند. در نهایت با توجه به اینکه سیستم تهویه جابجایی در زمان

جدول ۵. مقایسه پارامترهای نمودارهای مونوکسید کربن در سیستم‌های تهویه مختلف

Table 5. Comparison of CO diagram parameters in different ventilation systems

غلظت پایداری سیستم تهویه (پی پی ام)	زمان رسیدن به پایداری غلظت (ثانیه)	حداکثر غلظت (پی پی ام)	زمان رسیدن به پیک غلظت (ثانیه)	نوع سیستم تهویه
۵	۱۶۶	۶/۳	۶۶	جابجایی
۵	۱۶۶	۶/۳	۷۲	جت برخوردی
۵/۱۶	۱۶۸	۷/۵	۹۵	لایه‌ای

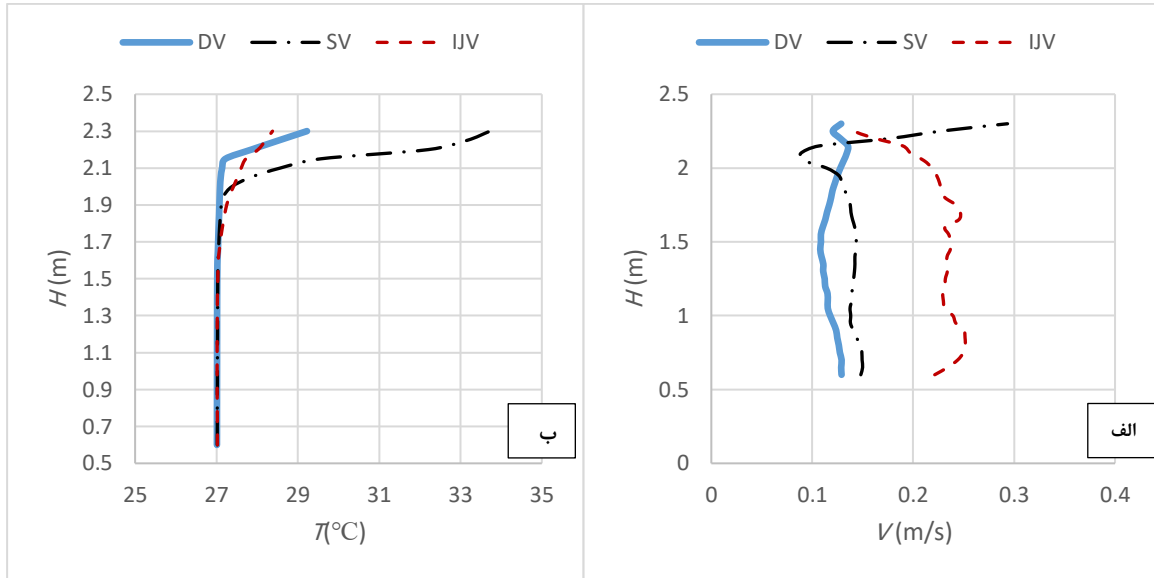
جدول ۶. مقایسه پارامترهای نمودارهای دی اکسید کربن در سیستم‌های تهویه مختلف

Table 6. Comparison of CO₂ diagram parameters in different ventilation systems

غلظت پایداری سیستم تهویه (پی پی ام)	زمان رسیدن به پایداری غلظت (ثانیه)	حداکثر غلظت (پی پی ام)	زمان رسیدن به پیک غلظت (ثانیه)	نوع سیستم تهویه
۳۰۰	۱۵۷	۳۳۰	۶۷	جابجایی
۳۰۰	۱۶۵	۳۳۰	۶۷	جت برخوردی
۳۵۰	۱۶۶	۳۷۰	۹۵	لایه‌ای

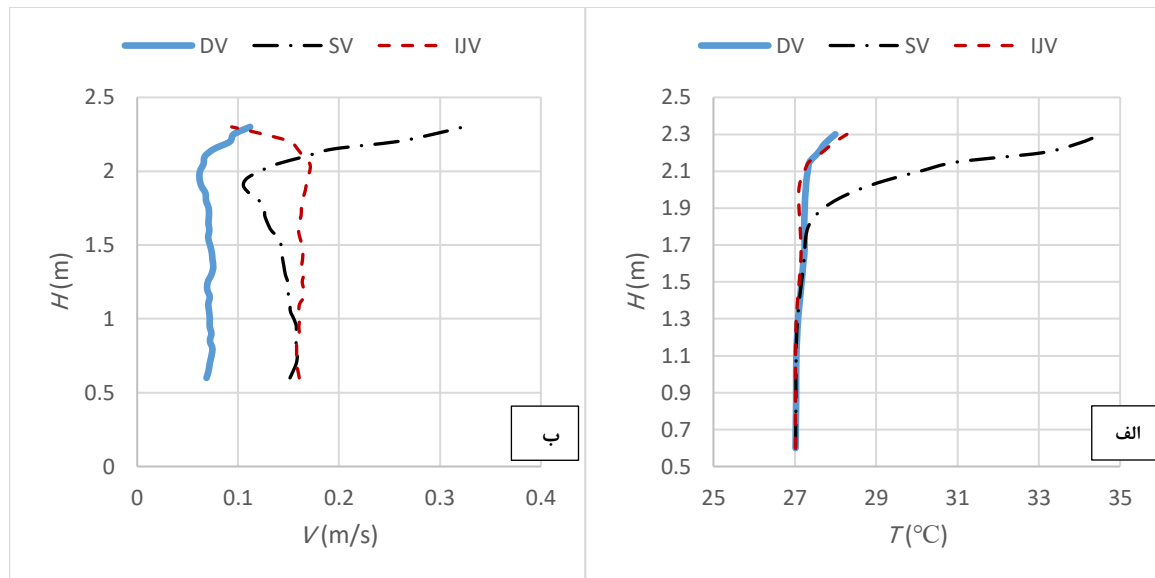
مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]، برای کنترل جریان دود که سبک‌تر و گرم‌تر از هوای محیط اطراف است عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. سیستم تهویه لایه‌ای در کنترل آلاینده‌های سنگین‌تر و سردتر از هوای اطراف که به سطح زمین نزدیک‌تر هستند عملکرد خوبی دارد [۶]، با توجه به نتایج، این سیستم در کنترل آلاینده‌های سبک‌تر و گرم‌تر از هوای اطراف که به سمت لایه‌های بالا در حرکت هستند عملکرد مطلوبی از خود نشان نداده است.

بنابراین هوای تازه را به صورت یک لایه برشی بسیار نازک در امتداد کف توزیع می‌کند. این سیستم توزیع هوا، جت هوا را قادر می‌سازد تا بر قدرت شناوری تولید شده از منابع گرما غلبه کرده و بیشتر به مناطق کف برسد [۶]. این فرایند باعث شده تا سیستم تهویه جت برخوردی بتواند عملکرد خوبی در کنترل دود حاصل از حریق داشته باشد. از آنجایی که سیستم تهویه جابجایی در فضاهایی که آلاینده‌ها سبک‌تر و گرم‌تر از هوای اطراف هستند



شکل ۱۰. مقایسه عملکرد سیستم‌های تهویه در درب شماره ۱، الف) دما ب) سرعت

Fig. 10. Performance comparison of ventilation systems in door number 1, a) Temperature - b) Speed

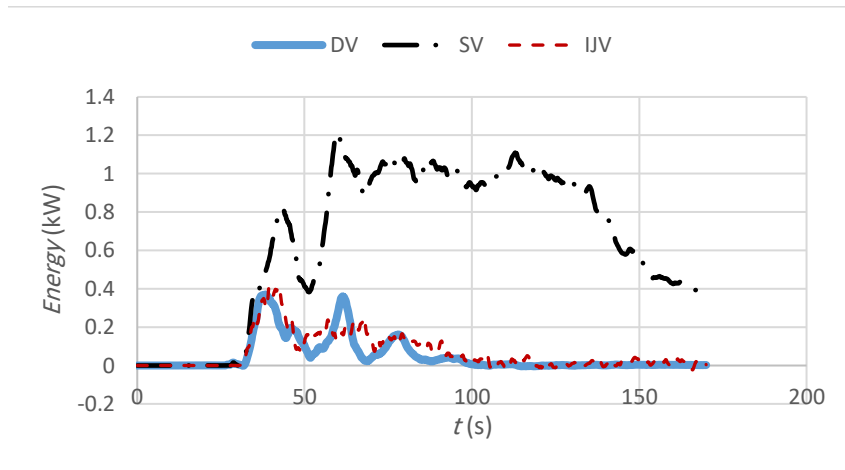


شکل ۱۱. مقایسه عملکرد سیستم‌های تهویه در درب شماره ۲، الف) دما ب) سرعت

Fig. 11. Performance comparison of ventilation systems in door number 2, a) Temperature - b) Speed

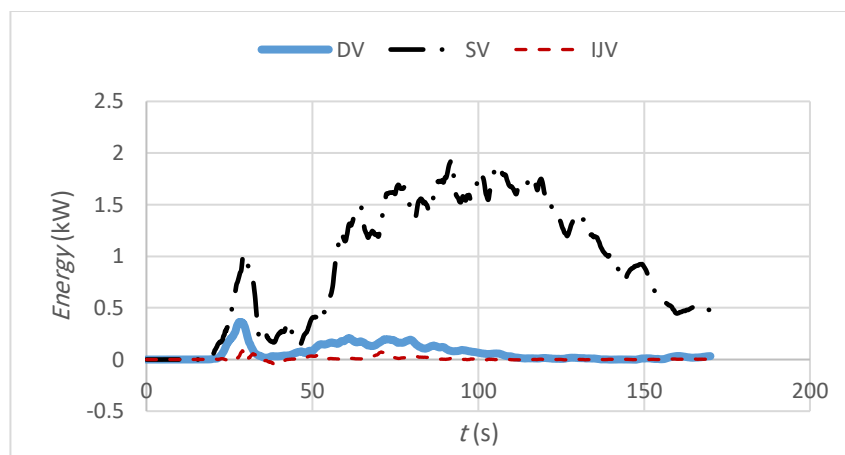
تاثیرگذار باشد میزان دمای هوا در راه خروجی افراد است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقایسه‌ای از میزان دما و سرعت هوا در درب‌های خروجی سالن (درب‌های ۱ و ۲) صورت گرفته است. در این نمودارها دما و سرعت بر حسب ارتفاع (۰/۶ تا ۲/۳ متر) در درب‌های خروجی اندازه‌گیری شده‌اند.

۴-۴- عملکرد سیستم‌های تهویه در کنترل حرارت حاصل از حریق
 ۴-۴-۱- مقایسه دما، سرعت و میزان حرارت خروجی از درب‌های سالن
 سینما
 از پارامترهای مهمی که می‌تواند بر خروج افراد از محیط در حین حریق



شکل ۱۲. مقایسه عملکرد سیستم‌های تهویه مختلف در کنترل میزان حرارت عبوری از درب شماره ۱

Fig. 12. Performance comparison of different ventilation systems in controlling the amount of heat exhaust through door number 1



شکل ۱۳. مقایسه عملکرد سیستم‌های تهویه مختلف در کنترل میزان حرارت عبوری از درب شماره ۲

Fig. 13. Performance comparison of different ventilation systems in controlling the amount of heat exhaust through door number 2

آن است که میزان حرارت تولیدی از حریق توسط دریچه‌های خروجی قبل از رسیدن به مسیرهای خروجی خارج شده‌اند. در بعضی سیستم‌های تهویه مانند سیستم تهویه جت برخوردی میزان حرارت منفی نیز دیده می‌شود که به دلیل معکوس شدن جریان هوا به سمت داخل و این نکته نیز مطلوب است زیرا که هوا با دمای کمتر از بیرون به داخل نفوذ می‌کند و دود نیز به راهروهای فرار منتشر نشده و در نهایت مسیر پاکیزه‌ای برای افراد برقرار خواهد بود.

در این بخش به بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه در خارج‌سازی حرارت حریق از طریق دریچه‌های خروجی پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ میزان حرارت خارج شده از درب‌های خروجی سالن بر حسب زمان آورده شده‌اند. این نمودارها نشان می‌دهند که سیستم‌های تهویه به چه میزان در خارج‌سازی حرارت از طریق دریچه خروجی موفق عمل کردند. در شکل ۱۲ بیشترین میزان حرارت عبوری از درب شماره ۱، مربوط به سیستم تهویه لابه‌ای با ۱/۲ کیلووات و کمترین میزان حرارت عبوری نیز مربوط به سیستم تهویه جت برخوردی با ۰/۱ کیلووات بوده است. این نتایج حاکی از

جدول ۷. مقادیر عملکرد حرارتی مربوط به درب شماره ۱

Table 7. Thermal performance parameters related to door number 1.

میزان حرارت در زمان پایداری سیستم تهویه (کیلووات)	زمان رسیدن به پایداری حرارتی (ثانیه)	حداکثر حرارت (کیلووات)	زمان رسیدن به پیک حرارتی (ثانیه)	نوع سیستم تهویه
۰	۱۰۰	۰/۴	۴۰	جابجایی
-	-	۰/۴	۴۳	جت بر خوردی
۰/۴	۱۶۶	۱/۲	۶۰	لایه‌ای

جدول ۸. مقادیر عملکرد حرارتی مربوط به درب شماره ۲

Table 8. Thermal performance parameters related to door number 2

میزان حرارت در زمان پایداری سیستم تهویه (کیلووات)	زمان رسیدن به پایداری حرارتی (ثانیه)	حداکثر حرارت (کیلووات)	زمان رسیدن به پیک حرارتی (ثانیه)	نوع سیستم تهویه
۰	۹۰	۰/۰۷	۳۰	جت بر خوردی
۰	۱۱۰	۰/۳۳	۳۰	جابجایی
-	-	۱/۹	۹۰	لایه‌ای

علت قرارگیری دریچه‌های توزیع هوا رو به روی درب ۲ است که به موجب آن جریان هوا نسبت به درب ۱ بیشتر می‌شود. در شکل ۱۳ دیده می‌شود که سیستم تهویه جت بر خوردی به خوبی توانسته میزان حرارت عبوری از درب ۲ را کنترل کرده و با دریچه‌های خروجی هوا این حرارت را به بیرون منتقل کند. پس از آن سیستم تهویه جابجایی تقریباً ۱۲۰ ثانیه بعد از شروع حریق توانسته میزان حرارت عبوری از درب را به حداقل و صفر برساند و آن را کنترل کند. بدترین عملکرد مربوط به سیستم تهویه لایه‌ای است که اگرچه حداکثر مقدار حرارت عبوری را تقریباً نزدیک به سایر سیستم‌های تهویه ثبت کرده اما روند نزولی پس از پیک حرارت مجدداً صعودی شده و به میزان ۶۰ ثانیه (از ثانیه ۶۰ تا ثانیه ۱۲۰) این حرارت در مقدار بالایی از درب در حال خروج بوده و همچنین نتوانسته حرارت خروجی را کنترل کرده و در بالاترین مقدار بین سیستم‌های تهویه دیگر یعنی ۰/۵ کیلووات به اتمام رسانده است. جداول ۷ و ۸ مقادیر مربوط به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ را در زمان‌های

با بررسی شکل ۱۲، دو سیستم تهویه جابجایی و سیستم تهویه جت بر خوردی است که تقریباً ۱۰۰ ثانیه بعد از شروع حریق میزان حرارت عبوری از درب را توانستند به نزدیک صفر برسانند. حداکثر حرارت عبوری از درب شماره ۱ در تمام سیستم‌های تهویه به جز سیستم تهویه لایه‌ای دقیقاً در زمان بیشترین نرخ آزادسازی حرارت از حریق یعنی ۴۰ ثانیه پس از شروع حریق مشاهده می‌شود و این در حالی است که در سیستم تهویه لایه‌ای حداکثر حرارت عبوری از درب در ۶۰ ثانیه پس از شروع حریق دیده شده و بر خلاف سیستم‌های تهویه دیگر که بلافاصله بعد از نقطه حداکثر آزادسازی حرارت، شروع به روند نزولی کرده‌اند و علت این موضوع آن است که گیر افتادن حرارت در سالن به علت گرده‌های بیشتر رخ داده و توسط دریچه‌های خروجی خارج نشده است.

در شکل ۱۳، اگر مقایسه‌ای با شکل ۱۲ صورت گیرد دیده می‌شود که میزان حرارت عبوری از درب ۲ نسبت به درب ۱ بیشتر است و این موضوع به

کمبودی در زمینه طلاق این دو مبحث مشاهده شد. تحقیق حاضر توانست به بررسی این کمبود بپردازد و راجع به عملکرد سیستم‌های تهویه زمانی که حریق اتفاق می‌افتد، خصوصاً در محیط‌های خاصی مانند سالن سینما و تئاتر که احتمال حریق زیاد است، بپردازد. این پژوهش به صورت یک شبیه‌سازی بر روی یک نمونه واقعی سالن سینما واقع در یک مجتمع فرهنگی از شهر تربت حیدریه در استان خراسان رضوی انجام شد.

از جمله پیشنهادهایی که در مورد این مباحث می‌توانند مورد تحقیق و بررسی قرار گیرند، عبارت است از:

-افزایش تعداد صندلی‌های آتش گرفته و بررسی نتایج در زمان گسترش حریق.

-بررسی تأثیر حضور افراد بر عملکرد سیستم‌های تهویه.

-بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه دیگری همچون سیستم تهویه اختلاطی و تهویه زیر سطحی در حضور حریق.

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی

Q	حجم هوای مورد نیاز در اتاق، m^3/hr
V	حجم فضا، m^3
n	تعداد دفعات تعویض هوا در ساعت
$B(x,s)$	چشمه انرژی، W/m^2
D	ضریب پخش، m^2/s
h_s	آنتالپی محسوس، kJ
I	شدت تشعشع، W/m^2Sr
k	ضریب هدایت حرارتی، W/mK
u	سرعت، m/s
T	دما، C
q''	شار انتقال حرارت، W/m^2
t	زمان، s
W	وزن مولکولی، gr/mol
Y	کسر حجمی

علائم یونانی

ν	ضریب استوکیومتری مواد در معادله احتراق
ρ	چگالی، kg/m^3
τ	تنش برشی، N/m^2

حداکثر حرارت عبوری و زمان رسیدن به پایداری حرارتی سیستم‌های تهویه برای درب‌های شماره ۱ و ۲ نشان می‌دهند. در این جداول دیده می‌شود که دو سیستم تهویه جابجایی و سیستم تهویه جت برخوردی $66/6$ درصد از سیستم تهویه لایه‌ای در جلوگیری از خروج حرارت از درب شماره ۱ بهتر عمل کردند. به همین صورت سیستم تهویه جت برخوردی به ترتیب ۷۸ درصد از سیستم تهویه جابجایی و ۹۶ درصد از سیستم تهویه لایه‌ای برای جلوگیری از خروج حرارت از درب شماره ۲ بهتر عمل کرده است. در همین راستا سیستم تهویه جابجایی نیز $82/6$ درصد از سیستم تهویه لایه‌ای در جلوگیری از خروج حرارت از درب شماره ۲ عملکرد بهتری داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار پایروسیم انجام شد. با شبیه‌سازی محیط سینما و جانمایی سیستم‌های تهویه و حریق، نتایج حاصل از جمله پروفیل‌های دمایی، نمودارهای مربوط به میزان ذرات دود و محصولات حاصل از حریق و کانتورهای دما ترسیم شدند. مقایسه یافته‌ها و نتایج حاکی از آن بودند که در نهایت از بین سیستم‌های تهویه جابجایی، لایه‌ای و جت برخوردی، عملکرد خوب در جهت کمک به کنترل حریق چه از لحاظ آلاینده‌گی و چه از لحاظ کنترل حرارتی مربوط به دو سیستم تهویه جابجایی و جت برخوردی که در کنترل آلاینده‌ها تا ۴۰ درصد و در کنترل حرارت خروجی از درب‌های سالن نیز تا ۹۶ درصد موفق به عملکرد بهتری شده است. با انتخاب زمان شبیه‌سازی ۱۷۰ ثانیه همگی سیستم‌های تهویه به استقلال از زمان در حل دست پیدا کردند. با مقایسه تمامی نتایج آلاینده‌ها و کنترل آن‌ها مشاهده شد علاوه بر این که سطح آلاینده‌های سمی حاضر در اتاق کمتر از سطح مجاز است، می‌توان این نتیجه را گرفت که برای حریق‌هایی با حجم کم حتی نیاز به استفاده از سیستم‌های اطفا حریق نیست و سیستم‌های تهویه می‌توانند به راحتی در زمان مناسبی این کنترل را انجام دهند تا منبع آتش به خارج از محیط منتقل شده یا در همان جا مهار شود. از آن جایی که در این پژوهش هیچ تغییری در حجم فن‌های هوادهی و خروجی صورت نگرفته، این نکته قابل تأمل است که با هزینه اولیه کمی برای طراحی، انتخاب و خرید سیستم‌های تهویه مناسب می‌توان سطح ایمنی ساختمان‌ها را بالا برد و از این که در زمان درست عمل نکردن سیستم‌های اطفا در فرایند کنترل حریق‌های با حجم کم خدشه‌ای وارد نمی‌شود، اطمینان حاصل کرد. بعد از بررسی تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌های عملکرد سیستم‌های تهویه در محیط‌های داخلی و حریق،

- and Air Quality in Uniform and Nonuniform Thermal Environments., *Indoor and Built Environment* , 22(4) (2012) 618-639.
- [12] H. B. Awbi , *Energy Efficient Room Air Distribution* , *Renewable Energy*, 15 (1998) 239-299.
- [13] C.K. Lee, H.N. Lam ,*Computer modeling of displacement ventilation systems based on plume rise in stratified environment* , *Energy and Buildings*, 39 (2007) 427-436.
- [14] K. Lee, T. Zhang, Z. Jiang, and Q. Chen, Comparison of airflow and contaminant distributions in rooms with traditional displacement ventilation and under-floor air distribution systems, *ASHRAE Transactions*, 115 (2) (2009) 306–321.
- [15] L. Tian, Z. Lin, Q. Wang, and J. Liu, Numerical investigation of indoor aerosol particle dispersion under stratum ventilation and under displacement ventilation, *Indoor and Built Environment*, 18(4) (2009) 360–375.
- [16] L. Tian, Z. Lin, and Q. Wang, Experimental investigation of thermal and ventilation performances of stratum ventilation, *Building and Environment*, 46(6) (2011) 1309–1320.
- [17] L. Tian, Z. Lin, and Q. Wang ,*Comparison of gaseous contaminant diffusion under stratum ventilation and under displacement ventilation*, *Building and Environment*, 45(9) (2010) 2035-2046.
- [18] A. C. K. Lai and F. Z. Chen, Comparison of a new Eulerian model with a modified Lagrangian approach for particle distribution and deposition indoors, *Atmospheric Environment*, 41(25) (2007) 5249–5256.
- [19] M. L. Pereira, G. Graudeniz, A. Tribess, and L. Morawska, Determination of particle concentration in the breathing zone for four different types of office ventilation systems, *Building and Environment*, 44(5) (2009) 904–911.
- [20] B. Zhao, Z. Zhang, X. Li, and D. Huang, Comparison of diffusion characteristics of aerosol particles in different ventilated rooms by numerical method, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 39 (2004) 89–96.
- [1] Q. Chen, A. Moser, *Indoor Air Quality and Thermal Comfort Under Six Kinds of Air Diffusion*, *ASHRAE journal*, 97(1) (1991) 22-29.
- [2] F. BAUMAN, E. ARENS, R. HELM, W. FISK, and D. FAULKNER, Air movement, comfort and ventilation in partitioned work stations, *ASHRAE journal*, 35(3) (1993) 42–50.
- [3] G. Cao, Awbi H, Yao R, Fan Y, Sirén K, Kosonen R , Zhang J., A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Building and Environment*, 73 (2014) 171–186.
- [4] B. Muller C, Danks R, Stanke D, Osborn J, Fisher F, Hedrick R, Rasmussen R and H. E. D, Alevantis L, Rogers L, Schoen L, Beaton M, Bellenger L, *Ashrae Standard 62.1*, (2007).
- [5] L. R. G. Yuan, Xiaoxiong, Qingyan Chen, A Critical Review of Displacement Ventilation, *ASHRAE Transactions Research*, (1998).
- [6] Z. L. B. Yang , A.K. Melikov , A. Kabanshi , C. Zhang , F.S. Bauman , G. Cao , H. Awbi , H. Wigö , J. Niu , K.W.D. Cheong , K.W. Tham , M. Sandberg , P.V. Nielsen , R. Kosonen , R. Yao , S. Kato , S.C. Sekhar , S. Schiavon , T. Karimipannah , X. Li and PII., A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions. , *Energy and Buildings*, 202 (2019).
- [7] Program and Budget Organization, *Building protection against fire*, Technical office, Tehran, (1368) (in persian).
- [8] Heydar Hashemi, Reza Khoshzad, *Fire search*, Naghoos Andisheh, Tehran, (1385) (in persian).
- [9] Office of National Regulation, *National Building Regulations*, The seventeenth topic, Tehran, (1389) (in persian).
- [10] Atefeh Taherkhani, *Effects of Carbon dioxide on health*, Conference on Industrial and Process Air Filtration, Tehran, (1390) (in persian).
- [11] I. Almesri, H. B. Awbi, E. Foda, K. Sire´n, *An Air Distribution Index for Assessing the Thermal Comfort*

- on Mathematical Modelling in Physical Sciences, (2013).
- [29] K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. E. Floyd, and R. McDermott, Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, (2015).
- [30] S. R. Turns, An Introduction to Combustion, 3rd edition, McGraw-Hill, USA (2012).
- [31] Hadi Pasdarsahri, Development of a more compatible subnet model with large vortex simulation method for numerical simulation of indoor fire, Tarbiat Modarres University, Phd Thesis, Tehran, (1392) (in persian).
- [32] L. H. Hu, R. Huo, W. K. Chow, Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires, Experimental Thermal and Fluid Science, 32 (2008) 1468-1483.
- [33] Framework for Fire Safety Design ,New Zealand Building Code Clauses C1 C6 Protection from Fire, The Ministry of Business, Innovation and Employment, (2014).
- [34] H. Jin Kim, David G. Lilley, Heat Release Rates of burning items in fires, American Institute of Aeronautics & Astronautics, 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibition, (2000).
- [35] Mojtaba Tabatabaei, Building facilities calculations, Iran's national library, Tehran, (1382) (in persian).
- [36] Ardeshir Farshidianfar, Smoke control engineering in the building, Engineering Organization of Khorasan Razavi, Mashhad, (1395) (in persian).
- [21] D. Rim and A. Novoselac, Ventilation effectiveness as an indicator of occupant exposure to particles from indoor sources, Building and Environment, 45(5) (2010) 1214–1224.
- [22] K. Zhong, X. Yang, Effects of ventilation strategies and source locations on indoor particle deposition, Building and Environment, 45(3) (2010) 655–662.
- [23] HOU Long-fei, LI Ming, CUI Wu-yuan, LIU Yu-chen, Numerical Simulation and Analysis of On-building High-rise Building Fires, Procedia Engineering, 11 (2011) 127-134.
- [24] J. Wahlqvist and P. Van Hees, Validation of FDS for large-scale well-confined mechanically ventilated fire scenarios with emphasis on predicting ventilation system behavior, Fire Safety Journal, 62 (2) (2013) 102–114.
- [25] S. Brohez and I. Caravita, Fire induced pressure in airhigh houses: Experiments and FDS validation, Fire Safety Journal, 114 (2020).
- [26] Y. Xiao and J. Ma, Fire simulation test and analysis of laminated bamboo frame building, Construction and Building Material., 34 (2012) 257–266.
- [27] L. Valasek, The use of PyroSim graphical user interface for FDS simulation of a cinema fire, International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, 7 (2013) 258-266.
- [28] J Glasa, L Valasek, P Weisenpacher and L Halada, Cinema Fire Modelling by FDS, International Conference

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ramezani, A. M. Jadidi, R. Rafee, Investigating the Effects of Loung Chair Fire in a Cinema Hall Using Displacement, Impingement Jet and Stratum Ventilation Systems, Amirkabir J. Mech Eng., 53(11) (2022) 5573-5594.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128



