مطالعه عددی گسترش گازهای سمی و داغ حریق در مجتمع مسکونی چندطبقه با و بدون سیستم اطفای حریق اسپرینکلر

حمید تجدد، قاسم حیدری‌نژاد[1]، محمد صفرزاده

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه عددی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه با استفاده نرم‌افزار اف‌دی‌اس انجام شد. هندسه شامل یک ساختمان پنج طبقه با مجموع ۲۵ واحد که اتاق آتش با سوخت هپتان، در واحد سوم در مرکز اتاق طبقه همکف قرار دارد. در هر اتاق پارامترهای دما و گونه‌هایی نظیر مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن اندازه‌گیری و نتایج از شروع احتراق تا ۱۰۰ ثانیه برای دو حالت با و بدون اسپرینکلر بررسی شد. با صحت‌سنجی مشخص شد که نتایج عددی این مطالعه با نتایج تجربی ۸ درصد خطای نسبی دارد. همچنین، در حالت بدون اسپرینکلر طی زمان ۳۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد رسید؛ اما در حالت با اسپرینکلر، خاموشی در اتاق آتش کمتر از ۲۰ ثانیه اتفاق افتاد. چنین رفتاری نیز برای گونه‌های سمی مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن اتفاق می‌افتد؛ به‌نحوی‌که در حالت بدون اسپرینکلر در تمامی طبقات بالای اتاق آتش در مخاطره قرار می‌گیرند. ازاین‌رو در یک جمع‌بندی، با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما و سایر گونه‌ها، می‌توان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاق‌ها پی برد.

کلمات کلیدی

حریق در ساختمان، نرم‌افزار اف‌دی‌اس، اطفای حریق اسپرینکلر، گازهای سمی و داغ، کنترل آتش

[1] نویسنده مسئول: Email: gheidari@modares.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

در جهان کنونی، وقایعی همچون آتش‌سوزی به‌طورکلی به‌عنوان یک رویدادی با مخاطرات و پیامدهای بالا شناخته می‌شوند. با احداث ساختمان‌های بزرگ و مجتمع‌های مختلف چالش جدیدی را برای ایمنی آتش‌سوزی ایجاد کرده است و تقاضای جدیدی را برای ارتقای سیستم‌های اطفای حریق و سایر پارامترهای جلوگیری از رشد و گسترش حریق را اعمال کرده است. یکی از حوزه‌های مهمی که در حال حاضر اغلب در بحث چالش‌های بزرگ اجتماعی کشورها وجود ندارد، تأثیر آتش‌سوزی بر سلامت، ایمنی، آب‌وهوا، تاب‌آوری جامعه و اقتصاد است [۱]. آتش‌سوزی می‌تواند خسارات قابل‌توجهی به ساختمان‌ها وارد کند. خسارات اقتصادی ناشی از آتش‌سوزی در کشورهای توسعه‌یافته به یک درصد از تولید ناخالص داخلی می‌رسد [۲]. آتش‌سوزی‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی شناخته می‌شوند که سالانه باعث مرگ حدود ۲۰۰۰۰۰ نفر در سراسر جهان می‌شود [۳] که از بین انواع آن، آتش‌سوزی در ساختمان سهم زیادی دارد. در بین آتش‌سوزی در ساختمان، حالتی که تعداد طبقات از یک طبقه بیشتر می‌شود، تعبیه راه‌های فرار و جلوگیری از نشر گازهای سمی به طبقات بالا و از این موارد، دغدغه‌هایی است که آتش‌سوزی در طبقات بالا را با چالش‌هایی روبرو می‌کند که مطالعه‌ی این سناریو را بیش‌ازپیش نمایان می‌سازد. سیستم‌های سیستم‌های

یکی از آسیب‌پذیرترین و پیچیده‌ترین سناریوهای مراحل آتش‌سوزی در ساختمان از لحاظ ایمنی آن، مرحله کاملاً توسعه‌یافته است [۴]. به همین منظور مطالعاتی در زمینه گسترش و کنترل حریق در ساختمان‌ها و محفظه‌های مختلف صورت گرفت؛ به‌طور مثال صفرزاده و همکاران [۵] به بررسی عددی رشد و گسترش آتش در ساختمان یک و سه‌طبقه پرداختند. با توجه به نتایج مشخص شد زمانی که حریق به خارج از اتاق منتشر می‌شود، می‌تواند طبقات بالایی را نیز در معرض گازهای سمی و داغ قرار دهد به‌نحوی‌که که دما در طبقه سوم به ۱۰۰۰ کلوین می‌رسد و گونه سمی دی‌اکسید کربن و مونواکسید کربن نیز به شرایط بحرانی برسد. صفرزاده و همکاران [۶] در تحقیقی دیگر مشاهده کردند که حتی با افزایش تعداد طبقات از ۳ به ۵ طبقه همچنان این مخاطره پابرجاست و طبقات بالای اتاق آتش، در معرض گازهای سمی و داغ قرار دارند.

بسیک و همکاران [۷] به بررسی نشر و گسترش گازهای داغ حاصل از احتراق و دود در یک ساختمان چندطبقه که در مقابل و مجاور آن نیز ساختمان چندطبقه دیگر قرار دارد پرداختند. با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس[1]، گسترش حریق و محصولات حاصل از آن را به ساختمان‌های دیگر در شرایطی که یکی از اتاق‌های این ساختمان آتش بگیرد، بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد؛ دمای پلوم آتش و غلظت آلاینده‌های گازی به مقدار هوای محیط در محفظه آتش بستگی دارد. مقادیر بیشتر اکسیژن در محفظه باعث غلظت کمتر مونوکسیدکربن و غلظت دی‌اکسید کربن بیشتر می‌شود. نتایج عددی نشان می‌دهد که برهمکنش قوی بین جریان باد و جریان پلوم آتش وجود دارد که با افزایش سرعت باد هوا ممکن است، گازهای سمی و داغ به داخل ساختمان‌های مجاور سرایت کرده و شرایط خطرناکی را ایجاد کند.

هوستیکا و جاناردان [۸] مجموعه‌ای از آزمایش‌های آتش‌سوزی را در یک ساختمان آپارتمانی در طبقه اول با مساحت ۵۸/۶ مترمربع تحت شرایط تهویه مختلف برای تأثیر افزایش فشار در محفظه‌ها و اثرات آن بر جریان تهویه انجام دادند. منبع سوخت از دو نوع آتش استخری هپتان و فوم پلی یورتان بوده و در پذیرایی واحد قرار داشته است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که فشار هوای ناشی از احتراق در آپارتمان نسبتاً بسته می‌تواند به اندازه‌ای بالا باشد که جریان‌های سیستم تهویه را بازگرداند. حداکثر دمای گاز در زیر سقف اتاق حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. بر اساس نتایج تجربی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر پیکربندی تهویه (نشت مؤثر) برافزایش فشار در محفظه قابل‌توجه است و باید در طول فرآیند طراحی ایمنی آتش‌سوزی در نظر گرفته شود. فشار بیش‌ازحد ناشی از آتش‌سوزی باید به‌عنوان یک خطر بالقوه برای تخلیه شناخته شود زیرا می‌تواند از فرار ساکنان از فضاهایی با درهای بازشو به سمت داخل جلوگیری کند.

البته علاوه بر نقش تعداد طبقات، پارامترهای دیگری همچون اندازه محفظه، تهویه، نوع و مقدار سوخت درگیر عواملی هستند که تکامل آتش را در این شرایط تعیین کرده و بر نشر گازهای سمی اثر می‌گذارند [۹]. با مشخص شدن آتش‌سوزی و دغدغه‌های مرتبط

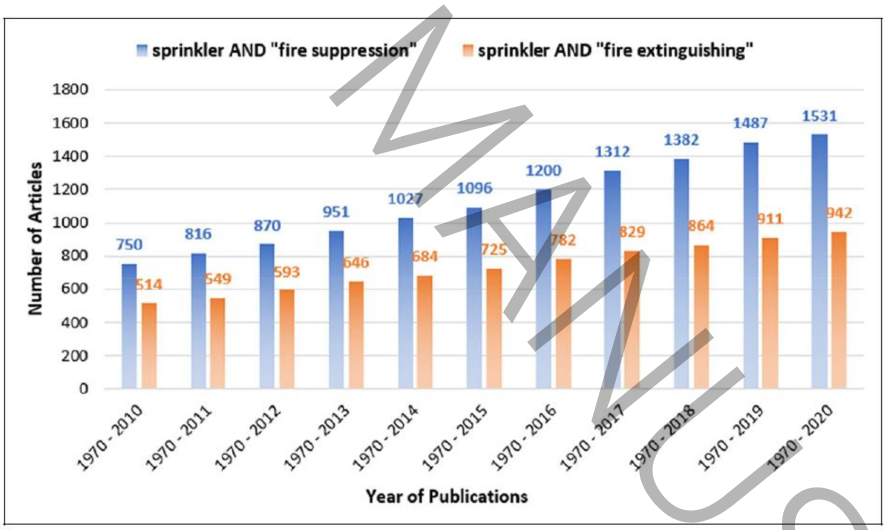
---

[1] Fire dynamics simulator software

ACCEPTED MANUSCRIPT

با آن، سازوکار کنترل و خاموشی آتش مهم‌تر از خود آتش می‌شود که تحقیقات مختلف از روش‌های مختلف به این موضوع پرداخته‌اند. یکی از این روش‌ها، استفاده از سیستم اطفاء حریق آبی نظیر سیستم اسپرینکلر[1] یا سیستم مه آب[2] [۱۰] است. قطرات آب با به کارگیری مکانیزم های کاهش دمای فاز پیوسته[3]، کاهش دمای سطح سوخت[4]، جذب انرژی تشعشی[5] و کاهش سطح اکسیژن[6] در محیط باعث خاموشی و مهار آتش می‌شوند [۱۱]. این فناوری‌ها اکنون کاربردهای گسترده‌ای در پیشگیری و مقابله با آتش‌سوزی ساختمان‌ها [۱۲] آتش‌سوزی تونل [۱۳]، آتش‌سوزی کشتی [۱۴و۱۵]، آتش‌سوزی انبارها [۱۶] آتش‌سوزی محفظه‌ای[7] [۱۷] و آتش سوزی آتش محافظت‌شده[8] [۱۸] دارد. مزایای استفاده از اسپرینکلرهای آتش‌نشانی نسبت به سایر تکنیک‌های اطفای حریق توسط بسیاری از محققین [۱۹]–[۲۱] به‌تفصیل موردبحث قرارگرفته است؛ اما تلاش فنی و تحقیقات علمی بیشتری در این زمینه لازم است تا از آن برای حفاظت ساختمان‌ها در برابر آتش‌سوزی‌ها استفاده بهینه شود.

حفاظت در برابر آتش، با عنوان‌هایی مانند سیستم اسپرینکلر و "خاموشی حریق"[9] یا سیستم اسپرینکلر و "کنترل و خاموشی حریق"[10] نیز شناخته می‌شود. به‌منظور ارزیابی و تجزیه‌وتحلیل میزان پرداختن به این موضوع عبدالرحمان و همکاران [۲۱] باهدف بررسی تعداد این دو کلیدواژه، در متون تحقیقاتی و نشریات پژوهشی در پایگاه‌های اطلاعاتی جستجو کرده و شکل ۱ را آماده کردند. با توجه به شکل ۱، تعداد مقالات موجود در مورد این دو کلیدواژه در ۵۰ سال گذشته (دوره ۱۹۷۰-۲۰۲۰) نشان داده‌شده است. درمجموع ۲۴۷۳ مقاله برای این دوره ۵۰ ساله یافت شده است که ۱۵۳۱ مقاله در عنوان از سیستم اسپرینکلر و "کنترل و خاموشی حریق" و ۹۴۲ مقاله از اسپرینکلر و "کنترل و خاموشی حریق" استفاده کرده‌اند. با مشاهده روند انتشارات به تفکیک سال در شکل ۱، می‌توان مشاهده کرد که موضوع حفاظت در برابر آتش، موردتوجه کافی و مستمر از سوی محققان قرارگرفته است که نشان می‌دهد چالش‌های علمی در این زمینه همچنان پابرجا و درحال‌توسعه است [۲۱].



شکل ۱. پیشرفت مقالات موجود بر اساس کلمات کلیدی برای دوره ۱۹۷۰–۲۰۲۰. [۲۱]

Fig 1. Articles available by keyword for the period 1970-2020. [21]

[1] Sprinkler System
[2] Watermist System
[3] Gas Phase Cooling
[4] Direct cooling
[5] Blocking Radiant heat
[6] Oxygen Displacement
[7] Compartment Fire
[8] Shield Fire
[9] Fire Extinguishing
[10] Fire Suppression

ACCEPTED MANUSCRIPT

در زمینه کنترل حریق و اطفای آن با استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در فضاهای گوناگون مطالعاتی صورت‌گرفته است. به طور مثال لیو و همکاران [۲۲] در مطالعه‌ای دو سیستم اطفای حریق رایج را (سیستم مه آب و سیستم اسپرینکلر) با مکانیسم‌های اطفای حریق متمایز و به‌صورت عددی در یک محفظه آتش کاملاً تهویه شده بررسی کردند. آتش استخری متان در مرکز محفظه بوده و ترموکوپل‌ها و حس‌گرهای اندازه‌گیری نیز مستقیماً روی آتش قرار داشتند. در سیستم اسپرینکلر، کاهش حرارت مستقیم از منطقه آتش نقش عمده‌ای برای اطفای حریق دارد، درحالی‌که اثر تبخیر سهم قابل‌توجهی در اثر اطفای حریق کلی ندارد. با توجه به زمان اطفای حریق، مطالعه حاضر نشان داد که تحت شرایط عملیاتی یکسان، سیستم با اندازه قطرات کوچک‌تر تمایل به عملکرد بهتری دارد.

نانساوت و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در انبار حاوی مواد کلاس A حریق با استفاده از نرم‌افزار افدی‌اس در شرایطی که آتش محافظت‌شده باشد، پرداختند. مواد قابل اشتعال بر روی پالت چوبی و در قفسه قرار داشتند. اثرات دما بر سقف و گسترش حریق بررسی شد و مشخص شد مجموعه اسپرینکلری که در سقف قرار داشت، قادر به اطفای حریق نبوده ولی از گسترش حریق جلوگیری کرده است.

وانگ و همکاران [۲۳] به بررسی آزمون‌های اطفای حریق در محیط ذخیره‌سازی پرداختند. در این آزمایش منبع سوخت در بین یکی از طبقات قرار داشته است که این قفسه‌ها دارای سه‌طبقه و شش ردیف بوده و دارای محصولات مقوایی است. دو سری اسپرینکلر شامل واکنش سریع[1] و واکنش استاندارد[2] در سقف قرار داده‌شده است. صحت‌سنجی نتایج عددی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی[3] و نرم‌افزار فایرفوم[4] انجام شد. نتایج نشان داد؛ اسپرینکلرهای واکنش سریع، آتش را به‌سرعت خاموش می‌کند درحالی‌که با اسپرینکلرهای واکنش استاندارد، علاوه بر آزمایش‌ها در شبیه‌سازی نیز، آتش را به پالت‌ها گسترش داده بود.

به‌طورکلی بررسی حریق در محفظه یا اتاق، یکی از مهم‌ترین سناریوهای آتش‌سوزی در ساختمان است که نسبت به فضای محیطی باز پیچیدگی‌های بیشتری دارد؛ چراکه حریق در فضای داخلی ساختمان، محبوس شده و نرخ آزادسازی حرارت سوخت، با توجه به تهویه فضا و نرخ انتقال حرارت محیط تغییر می‌کند [۲۴]. با روند رشد و گسترش حریق و پدیده‌های مختلفی نظیر فلش‌آور[5] و بک درفت[6] در اتاق، حجم محصولات احتراق، گازهای سمی و دود افزایش پیداکرده و به سمت طبقات بالاتر و اتاق‌های مجاور حرکت و سرایت می‌کند.

با توجه به‌مرور و بررسی مطالعات پیشین، یکی از خلأهای این مطالعات، عدم بررسی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه به‌منظور عدم نشر گازهای سمی و داغ به طبقات بالاست. با توجه به این موضوع، در این پژوهش ابتدا رشد و گسترش آتش در ساختمان در فضای داخلی ساختمان با قراردادن منبع سوخت در مرکز اتاق در طبقه همکف، بررسی‌شده و در گام دوم تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در کنترل حریق و جلوگیری از نشر گازهای سمی و دود در طبقات بالاتر و مجاور بررسی و مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم

رفتار حریق در محیط یک پدیده فیزیکی و از نوع جریان اغتشاشی است. یکی از روش‌های رایج که برای مطالعه فیزیک اغتشاش در جریان حریق استفاده می‌گردد، متوسط‌گیری مکانی با استفاده از فیلتر و روش گردابه‌های بزرگ[7] است. تشخیص گردابه‌های بزرگ و کوچک نیازمند وجود یک فیلتر است. در روش گردابه‌های بزرگ، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه ترم تنش ناشی از اغتشاش بسیار

[1] Early Suppression Fast Response (ESFR)
[2] Standard Response Sprinkler Heads
[3] Computational Fluid Dynamics (CFD)
[4] fireFoam software
[5] Flash over phenomenon
[6] Backdraft phenomenon
[7] Large Eddy Simulation (LES)

ACCEPTED MANUSCRIPT

گسترده و پیچیده بوده است. برای مدل‌سازی شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، روش شناخته‌شده اسماگورینسکی وجود دارد که از آن استفاده شده است. همچنین معادله انتقال حرارت تابشی و معادله تابع دیواره در محاسبات لحاظ گردیده است.

برای محاسبه خواص جریان‌های چند فازی مانند افشانه‌ها [۲۵] یا جریان‌هایی که از ذرات بی‌شماری تشکیل شده‌اند، از دیدگاه اویلری-لاگرانژی استفاده می‌شود. این رویکرد برای نشان دادن یک خانواده از تکنیک‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی استفاده می‌شود که در آن قطرات یا ذرات در چارچوب مرجع لاگرانژی و میدان جریان فاز پیوسته در چارچوب مرجع اویلری نشان داده می‌شود [۲۶].

۲-۱ معادلات فاز پیوسته (اولری)

در فاز پیوسته نیاز است که معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه در کنار معادله حالت حل شوند. با توجه به اینکه در این مطالعه از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است نیاز است که معادلات ابتدا فیلتر گیری مکانی شده و بعد از آن با اعمال مدل زیر شبکه گسسته‌سازی شده و حل شوند. در مختصات کارتزین، معادلات متوسط‌گیری [۲۷] به فرم معادلات (۱) الی (۵) است.

$$\frac{\partial\bar{\rho}}{\partial t}+\nabla.(\bar{\rho}\tilde{u})=\dot{m}_b''' \qquad \text{بقای جرم} \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u})}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{u})=-\nabla\bar{P}+\nabla\cdot\left[\mu_{eff}\left(\nabla\tilde{u}+(\nabla\tilde{u})^T-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\tilde{u})I\right)\right]+\bar{\rho}g+f_b \qquad \text{بقای مومنتوم} \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial\left(\bar{\rho}\tilde{h}_s\right)}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{h}_s\right)=\overline{\frac{D_p}{Dt}}+\nabla\cdot\left[\bar{\rho}\left(D_{th}+\frac{\nu_{sgs}}{\mathrm{Pr_t}}\right)\nabla\tilde{h}_s\right]-\nabla\cdot\overline{\dot{q}_r''}+\overline{\dot{q}_c''}+\overline{q_b'''} \qquad \text{بقای انرژی} \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{Y}_k)}{\partial t}+\nabla\cdot(\bar{\rho}\tilde{u}\tilde{Y}_k)=\nabla\cdot\left[\bar{\rho}\left(D_k+\frac{\upsilon_{sgs}}{\mathrm{Sc_t}}\right)\nabla\tilde{Y}_k\right]+\dot{m}_{b,k}'''+\overline{\dot{\omega}_k'''}\ ,\ (k=1,...,N_s-1) \qquad \text{انتقال گونه‌ها} \qquad (۴)$$

$$p_0=\rho R_u T\sum_{\alpha}\frac{Y_\alpha}{W_\alpha} \qquad \text{معادله حالت} \qquad (۵)$$

در معادله بقای جرم $\bar{\rho}$ چگالی، $\tilde{u}$ سرعت، $\dot{m}_b'''$ در معادله بقای مومنتوم μ_{eff} ویسکوزیته موثر (ترکیب ویسکوزیته اغتشاشی و آرام)، g شتاب گرانشی، f_b مجموعه نیروهای وارد ذره از فاز گسسته به فاز پیوسته است. در معادله بقای انرژی $\tilde{h}_s$ انرژی محسوس، D_{th} ضریب انتشار حرارتی، Pr_t عدد پرانتل جریان مغشوش، $\overline{\dot{q}_r''}$ شار حرارت تابشی، $\overline{\dot{q}_c''}$ نرخ آزاد شدن گرما در واحد حجم در اثر احتراق، $\overline{q_b'''}$ گرمای ناشی از تبخیر ذرات بوده، در معادله بقای گونه $\tilde{Y}_k$ کسر جرمی گونه، D_k ضریب انتشار جرم گونه، $\mathrm{Sc_t}$ عدد اشمیت آشفته، $\dot{m}_{b,k}'''$ نرخ تغییر جرم ذرات و $\overline{\dot{\omega}_k'''}$ نرخ سرعت واکنش گونه هستند [۲۷]. در نرم‌افزار اف‌دی‌اس انتقال حرارت تابشی به‌صورت یک معادله انتقال برای گاز خاکستری حل می‌شود [۲۸]. معادله انتقال تابشی برای فضایی که دارای پارامترهای تشعشع (جذب، نشر و انعکاس) است، به‌صورت رابطه (۶) است [۲۹].

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

در رابطه (۶) $\kappa(x,\lambda)$ ضریب موضعی جذب، $\sigma_s(x,\lambda)$ ضریب موضعی انعکاس، $B(x,s)$ چشمه نشر انرژی تشعشعی، $I_\lambda(x,s)$ شدت تابش[1] در طول‌موج λ است. ترم انتگرال در سمت راست رابطه (۶)، بیانگر انرژی تشعشعی انعکاس یافته در جهات دیگر است [۲۹].

[1] Radiation intensity

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۲ معادلات فاز گسسته (لاگرانژی)

در این پژوهش، حالت اسپری اسپرینکلر با دیدگاه لاگرانژی نشان داده می‌شود. در این دیدگاه فاز پیوسته (شامل محصولات احتراق، ستون آتش، شعله و واکنش‌دهنده‌ها) به‌عنوان یک میدان اویلری در حال تکامل نشان داده می‌شود، درحالی‌که فاز گسسته (قطرات آب) با استفاده از ذرات لاگرانژی مدل‌سازی می‌شود. در این مدل‌ها، ذرات لاگرانژی به دامنه محاسباتی تزریق می‌شوند. حرکت ذرات با حل معادلات لاگرانژی حرکت و برهمکنش بین فاز پیوسته و گسسته تعیین می‌شود [۳۰]. تکامل قطره توسط ردیابی ذرات لاگرانژی به‌خوبی توسعه‌یافته است و در مطالعاتی [۲۳و۳۱] از ذرات لاگرانژی برای شبیه‌سازی اسپری‌های اسپرینکلر آتش استفاده کرده‌اند. معادلات حاکم بر فاز گسسته (لاگرانژی) بر اساس روابط (۷) الی (۱۱) است [۳۲].

(۷) بقای جرم

$$\frac{dm_l}{dt} = -Ah_m \rho (Y_l - Y_g)$$

(۸) بقای مومنتوم

$$\frac{d}{dt}(m_d u_d) = -\frac{1}{2}\rho C_D \pi r_d^2 (u_d - u)\left|u_d - u\right| + m_d g$$

(۹) بقای انرژی

$$m_c c_l \frac{dT_l}{dt} = Ah(T_g - T_l) + \frac{dm_l}{dt} h_v + \dot{q}_r$$

(۱۰) غلظت بخار اشباع

$$X_d = \exp\left[\frac{h_v M_w}{R}\left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_d}\right)\right] \quad , \quad Y_d = \frac{X_d}{X_d(1 - M_a / M_w) + M_a / M_w}$$

(۱۱) نرخ تبخیر قطره آب

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi r_d \mathrm{Sh} \rho D \left(Y_d - Y_g\right) \quad , \quad \mathrm{Sh} = 2 + 0.6\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{Sc}^{\frac{1}{3}}$$

در رابطه (۷) h_m ضریب انتقال جرم، ρ چگالی فاز گازی، Y_l کسرجرمی‌بخار در سطح آزاد مایع، Y_g کسرجرمی‌بخار در فاز پیوسته (سطح قطره) است. در رابطه (۸) m_d جرم قطره آب، C_D ضریب درگ، u_d سرعت قطرات آب، u سرعت فاز گاز است. در رابطه (۹)، T_g دمای محیط، T_l دمای یکنواخت قطرات فرضی، A مساحت سطح قطره، m_l جرم قطره، h ضریب انتقال حرارت، c_l گرمای ویژه مایع است و h_v گرمای نهان تبخیر و $\dot{q}_r$ سرعت تابشی قطره است. در یک دمای معین، مقدار مول بخار، در ذرات آب به‌عنوان غلظت بخار اشباع در آن دما به‌صورت رابطه (۱۰) در نظر گرفته می‌شود و نرخ تبخیر قطره آب از معادله (۱۱) پیروی می‌کند [۳۳].

۳- روش عددی

در این مطالعه برای شبیه‌سازی حریق از نرم‌افزار شبیه‌ساز دینامیک آتش نسخه ۶,۷,۶ استفاده شده است. این نرم‌افزار توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری توسعه‌یافته است و اغلب برای شبیه‌سازی آتش‌سوزی ساختمان استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به‌صورت کد متن‌باز[1] بوده و به‌صورت عددی شکلی از معادله ناویر-استوکس را برای جریان با ماخ پایین و جریان حرارتی را با تأکید بر انتقال گرما و دود ناشی از آتش‌سوزی حل می‌کند [۳۴]. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی جریان آشفته، روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای تحلیل جریان آشفته ناشی از آتش‌سوزی اعمال می‌کند. احتراق سوخت با استفاده از مدل احتراق اتلاف گردابه‌ای محاسبه می‌شود و از روش اویلر-لاگرانژی برای تحلیل رفتار جریان دوفازی بین قطرات آب و جریان هوای اطراف استفاده می‌کند [۳۵]. برای حل معادلات دیفرانسیل جزئی از روش تفاضل محدود[2] با دقت زمانی و مکانی مرتبه دوم گسسته شده و به‌صورت صریح[3] حل‌شده است.

---

1 Open source
2 Finit difference
3 Explicit

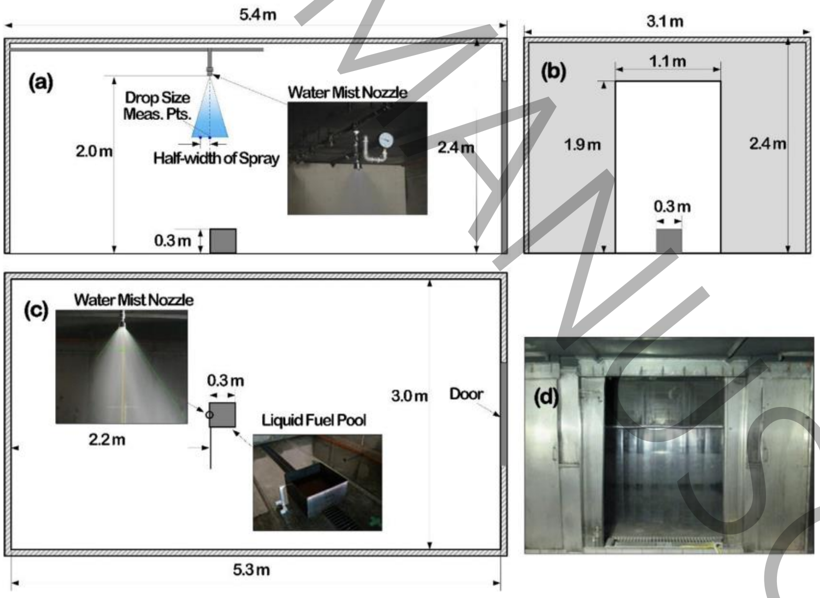
برای ایجاد رابط بصری بهتر و سهولت انجام شبیه‌سازی از رابط گرافیکی به نام پایروسیم[1] نیز استفاده شده است که این برنامه نیز توسط موسسه ملی استاندارد و فناوری آمریکا توسعه‌یافته است [۳۶]. میدان حل در این کد با استفاده از مش‌های مکعبی سازمان‌یافته انجام شد. به‌منظور رفع وابستگی معادلات انتقال حاکم بر جریان سیال از الگوریتم سیمپل محاسبه می‌کند [۳۷]. برای انجام مطالعات از یک دستگاه کامپیوتر با پردازشگر اینتل-۴۹۷۰ کا با فرکانس ۳/۵ گیگاهرتز که ۴ هسته حقیقی ۴ هسته مجازی و ۲۰ گیگابایت حافظه موقت دارد، استفاده شده است.

۴- صحت سنجی

گام اول در مطالعه عددی، بررسی شبکه و صحت‌سنجی است. به این منظور با انتخاب هندسه نزدیک به اتاق‌های مجتمع موردنظر، صحت‌سنجی انجام می‌شود.

۴-۱ مطالعه شبکه

برای تجزیه و تحلیل نتایج ابتدا بایستی صحت‌سنجی نتایج انجام شود. به همین منظور محفظه دو پارامتر نرخ آزادسازی حرارت و زمان خاموشی در پژوهش لی [۳۸]، شبیه‌سازی‌شده و با نتایج اعتبارسنجی شد. این محفظه دارای اندازه ۲۴۰×۳۰۰×۵۳۰ سانتی‌متر مکعب است. منبع سوخت از نوع آتش استخری هپتان که در مرکز محفظه قرار داشته و دارای ابعاد ۳۰×۳۰×۳۰ سانتی‌متر مکعب بوده است. این محفظه از طریق درب بازشو به تهویه طبیعی دسترسی داشته و دارای ابعاد ۱۱۰×۱۹۰ سانتی‌متر مربع است. سیستم اطفای حریق آبی از نوع مه آب با یک نازل در مرکز تعبیه‌شده است که بالای منبع سوخت در ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متری قرار دارد. نازل پس از زمان ۱۰ ثانیه از ابتدای شروع فرایند احتراق عمل نموده و در مدت‌زمان ۲/۵ ثانیه خاموشی حاصل می‌شود. سایر مشخصات این مطالعه در جدول ۱ به همراه نمایی از هندسه در شکل ۲ نشان داده‌شده است.



شکل ۲. نمایی از هندسه تجربی به همراه جزئیات [۳۸]

Fig 2. A view of experimental geometry with details [38]

[1] Pyrosim software

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱. پارامترهای ورودی شبیه‌سازی

Table 1. Simulation input parameters

پارامتر	جزئیات	مشخصات
شبکه	۶۰۲۳-۲۹۲۶۴۰۰	شبکه انتخابی ۳۶۵۸۰۰
شرایط مرزی	شرایط باز	۵/۴×۳/۱×۲/۴ متر
مواد و سازه‌ها	سقف و دیواره	ضخامت بتن دیوار = ۰/۵ متر سطح داخلی: ضخامت فولاد = ۰/۰۰۲ متر
	درب	اندازه دهانه اصلی: ۱/۱ عرض × ۱/۹ ارتفاع متر
احتراق	دمای محیط	۲۰ درجه سانتی‌گراد
	گرمای احتراق	۴۴۵۶۶ کیلوژول بر کیلوگرم
	فرض تکامل نرخ آزادسازی حرارت	تابع t^2، نزدیک شدن به زمان حداکثر به ۱ ثانیه
	نرخ آزادسازی حرارت در واحد سطح	۲۷۱۶/۱۴ کیلووات بر مترمربع
	نوع سوخت	نرمال هپتان (C_7H_{16})
	مقدار دوده	۰/۰۳۷ کیلوگرم بر کیلوگرم
	اندازه بستر سوخت	۰/۳ ×۰/۳ متر
سیستم اطفای حریق اسپرینکلر	دبی نازل	۲۲/۴۵ لیتر در دقیقه
	دمای اولیه آب	۲۰ درجه سانتی‌گراد
	ضریب K	۷/۱
	فشار عملیاتی	۱۰ بار
	قطر متوسط قطره	۱۲۴/۶ میکرومتر
	تابع توزیع قطره	رازین راملر لگاریتمی با γ = ۲/۲۲ و σ = ۰/۵۲
	زمان فعال‌سازی سیستم	۱۰ ثانیه

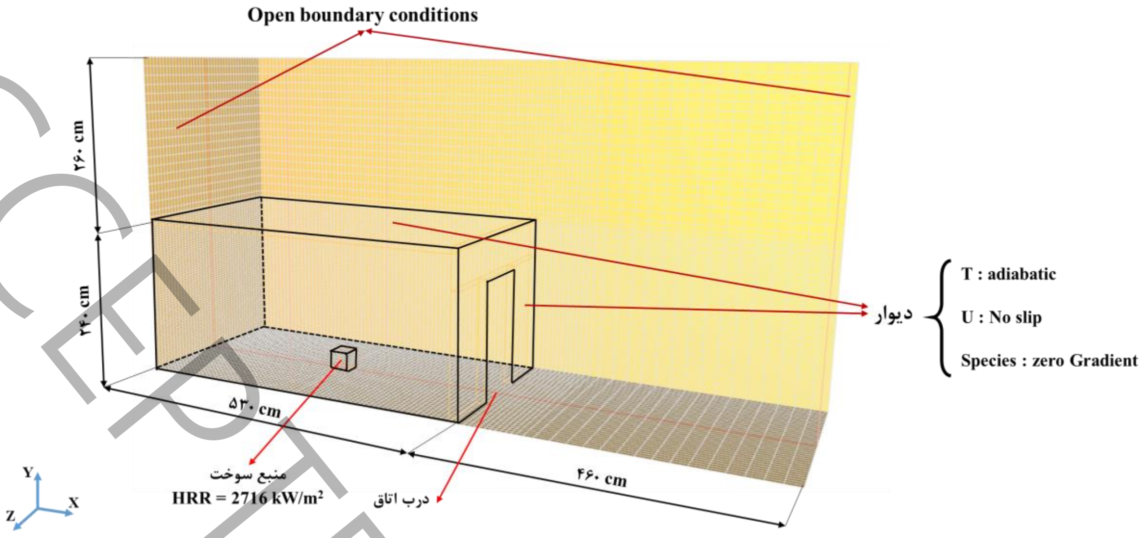
۴-۲ شرایط مرزی

در شکل ۳ شبکه‌بندی و مرز هندسه نشان داده شده است. جریان هوای داخل اتاق از طریق درب اتاق به تهویه طبیعی (محیط آزاد) ارتباط دارد و دیواره آن شرط مرزی عدم لغزش برای سرعت و گرادیان صفر برای دما و گونه دارد. برای مدل‌سازی لازم است، ناحیهٔ محاسباتی اضافی در نظر گرفته شود و بدین صورت مطابق شکل ۳ ناحیه‌ای در بالا و جلوی اتاق در نظر گرفته‌شده است. این امر به‌منظور به حداقل رساندن اثر عددی، شرط آزاد[1] بر جریان هوای داخل بر در سطح درب گسترش‌یافته است (یعنی اجازه می‌دهد دود و محصولات حاصل از احتراق آزادانه از اتاق خارج شود و از پایین درب جریان ورودی ایجاد کند). تعیین ابعاد دامنه محاسباتی در راستای X و Y لحاظ شده است؛ زیرا جریان هوای حاصل از محصولات خروجی احتراق به دلیل نیروی گرانشی در راستای Y حرکت می‌کند. به همین منظور برای دامنه عددی ۲۶۰ سانتی‌متر از درب ورودی فضای بالایی در نظر گرفته و ۴۶۰ سانتی‌متر نیز از درب خروجی اتاق، فضا به اتاق اضافه‌شده است.

[1] Open Boundary condition

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۳. نمایی از هندسه تجربی به همراه جزئیات در نرم‌افزار FDS

Fig 3. A view of experimental geometry with details in FDS software

۴-۳ بررسی شبکه

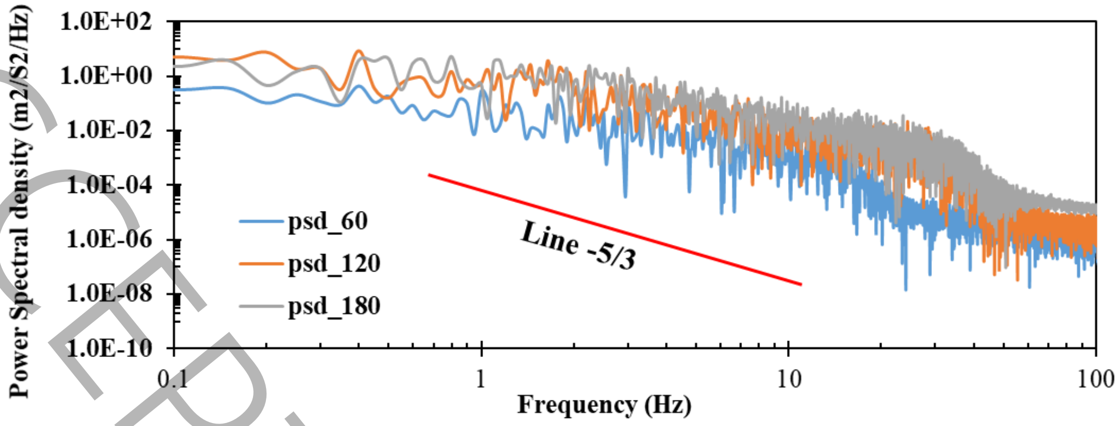
ازآنجایی‌که تعداد کل سلول‌ها و اندازه سلول شبکه بر نتایج شبیه‌سازی تأثیر می‌گذارد، تعداد سلول‌های شبکه باید از طریق تجزیه و تحلیل حساسیت شبکه تعیین شود. قطر مشخصه (D*) برای یافتن تعداد بهینه سلول به‌صورت زیر بیان می‌شود [۳۹].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}_f}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad \frac{D^*}{dx} = 4_16 \qquad (۱۲)$$

در رابطه (۱۲) D* قطر مشخصه، $\dot{Q}_f$ نرخ انتشار گرما، ρ_∞ چگالی محیط، c_p گرمای ویژه محیط، T_∞دمای محیط است. اگر مقدار D*/dx بین ۴ تا ۱۶ باشد، نتایج شبیه‌سازی برای اندازه تعیین‌شده آتش صحیح پیش‌بینی‌شده است [۴۰] که در مطالعه حاضر این مقدار برابر با ۱۵ است. بااین‌حال، توصیه می‌شود که برای تعیین اندازه سلول‌ها و تعداد کل سلول‌ها، یک تجزیه‌وتحلیل حساسیت شبکه نیز جداگانه انجام شود [۳۵].

یکی از پارامترهای دیگر به‌منظور بررسی مطالعه‌ی شبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، استفاده از طیف انرژی کولموگرو می‌باشد. با توجه به این نکته که جریان حریق مورد بررسی یک جریانی اغتشاشی است، لازم است که در هر نقطه که این طیف استخراج شود، شیب ۵/۳- دیده شود. به‌منظور ترسیم طیف انرژی کولموگرو، باید که انرژی ذخیره‌شده در این گردابه‌ها به دست آورده شود و آن را با توجه به فرکانس مرتبط با آن ترسیم نمود. ازاین‌رو با استفاده از آنالیز فرکانسی فوریه سهم هر گردابه با هر فرکانس (و درنتیجه آن انرژی جنبشی آن) محاسبه‌شده و چگالی طیفی توان[1] آن به دست می‌آید. در شکل ۴ نمودار تغییرات چگالی طیفی توان بر اساس فرکانس برای نقطه‌ی با فواصل ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ سانتیمتری از سطح بستر سوخت، آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، شیب نمودار چگالی طیفی توان برحسب فرکانس با خط ۵/۳- مطابقت دارد و ازاین‌رو می‌توان بیان کرد که شبکه مورد استفاده توانسته است که فیزیک جریان اغتشاشی حاکم را مدل سازد.

[1] Power Spectral Density (PSD)

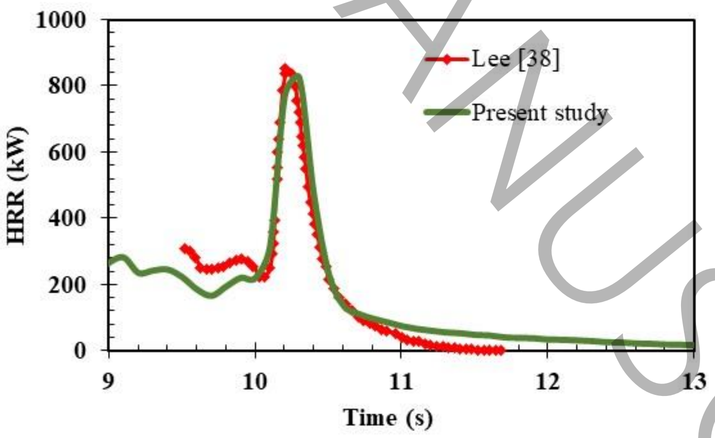


شکل ۴. مطالعه شبکه – تغییرات چگالی طیفی توان بر اساس فرکانس

Fig 4. Grid study – PSD variations based on frequency

۴-۴ صحت سنجی مدت‌زمان خاموشی و نرخ آزادسازی حرارت

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، دو پارامتر مدت‌زمان خاموشی و نرخ آزادسازی حرارت بامطالعه تجربی مقایسه می‌گردند. در شکل ۵ نتایج نرخ آزادسازی حرارت برحسب زمان برای نتایج عددی حاضر با نتایج لی [۳۸] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تا زمان قبل از ۱۰ ثانیه که هنوز اسپرینکلر فعال نشده است، مقدار نرخ آزادسازی حرارت در محدوده‌ی ۲۵۰-۳۰۰ کیلووات است و بعد از اسپری آب (در زمان ۱۰ ثانیه) این مقدار به بیشینه‌ی خود (۸۵۰ کیلووات) می‌رسد و بعد از آن فرآیند خاموشی آتش شروع‌شده و در زمان ۱۱/۵ ثانیه، احتراق کاملاً خاموش می‌گردد. اگر به نمودار شکل ۵ دقت شود مشاهده می‌شود که نتایج عددی و مطالعه‌ی لی [۳۸] بر یکدیگر مطابقت خیلی خوبی دارند؛ به‌نحوی‌که مقدار خطا کمتر از ۱۰ درصد است و حتی نواحی بیشینه و کمینه شدن را نیز به‌خوبی توانسته است که مدل کند.



شکل ۵: صحت‌سنجی نتیجه عددی دما

Fig 5. Validation of numerical results of temperature

در جدول ۲ مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا احتراق خاموش شود، برای نتایج عددی حاضر، تجربی و عددی لی [۳۸] آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی حاضر مدت‌زمان خاموشی ۳ ثانیه است که در مقایسه بازمان تجربی که ۲/۵ ثانیه است، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد که قابل‌قبول است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۲. مقایسه مدت‌زمان خاموشی

Table 2. Comparison of blackout duration

ردیف	نتایج تجربی	نتایج عددی لی	نتایج عددی حاضر
مدت‌زمان خاموشی (ثانیه)	۲/۵	۱/۷	۲/۷
خطای نسبی	-	۳۲ درصد	۸ درصد

۵- نتایج عددی

پس از صحت‌سنجی نتایج، اثر اسپرینکلر در مجتمع چندطبقه بررسی می‌گردد. به این منظور ابتدا کلیاتی از نحوه انتشار گازهای سمی و داغ در مجتمع موردنظر در حضور و عدم حضور اسپرینکلر بررسی می‌گردد و سپس با معرفی شاخصی برای حدود بحرانی گازهای سمی و داغ، اتاق‌های در معرض مخاطره شناسایی می‌گردد.

۵-۱ هندسه ساختمان چندطبقه

هندسه موردمطالعه یک ساختمانی با کاربری تجاری-مسکونی با ۲۵ اتاق هست که اتاق‌های طبقه همکف با کاربری تجاری و طبقات ۱ الی ۴ کاربری مسکونی دارد. در این هندسه از سایر جزئیات معماری ساختمان مانند راه‌پله‌ها و فضاهای مختلف صرف‌نظر شده و به‌صورت اتاق‌های ساده در نظر گرفته‌شده است. تمرکز اصلی برای تجزیه‌وتحلیل گسترش و نشر حریق و محصولات حاصل از احتراق در بین واحدهای مجاور و طبقات بالایی است و در گام بعدی استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر برای کنترل و خاموشی آتش است. هندسه اصلی اتاق از مطالعه لی [۳۸] در نظر گرفته‌شده است که در پژوهش خود این هندسه را به‌صورت تک محفظه‌ای در نظر گرفته و به‌صورت تجربی و عددی اثر اطفای حریق سیستم مه آب با یک نازل را در برهمکنش پلوم آتش استخری هپتان انجام داده است.

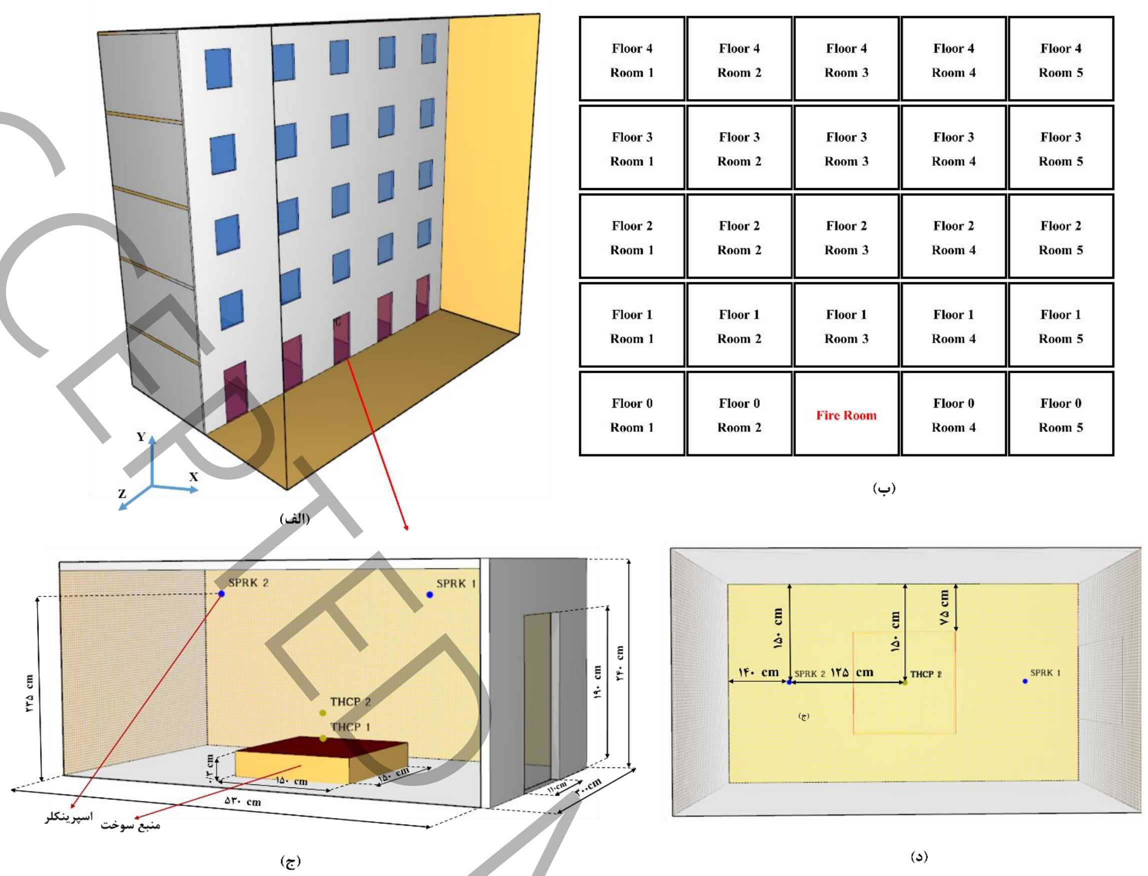
در پژوهش حاضر این هندسه به‌صورت واحدهای مستقل در قالب یک ساختمان فرض شده است. منبع سوخت و سایر پارامترهای اندازه‌گیری شامل حس‌گرهای دما، گونه و سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در طبقه همکف و در واحد سوم قرار دارد. منبع سوخت از نوع هپتان بوده و در مرکز اتاق با ابعاد ۳۰×۱۵۰×۱۵۰ سانتی‌متر و اسپرینکلرها از نوع واکنش استاندارد و پایین زن (مشخصات در جدول ۳ آورده شده) در ارتفاع ۲۳۵ سانتی‌متری از کف اتاق قرار دارد. مشخصات کامل اتاق به همراه جزئیات نصب تجهیزات به‌تفصیل در شکل ۶ نشان داده‌شده است.

اسپرینکلرها پس از گذشت زمان ۱۰ ثانیه فعال خواهند شد. در نرم‌افزار اف‌دی‌اس، قطرات را می‌توان با یک توزیع تک پراکنده، تولید قطرات با همان اندازه یا با اندازه‌های مختلف قطرات بر اساس تابع توزیع اندازه قطره اسپری کرد [۳۵]. در مطالعه حاضر از توابع توزیع رازین راملر استفاده شد.

جدول ۳: مشخصات اسپرینکلر

Table 3. Sprinkler specifications

نوع اسپرینکلر	ضریب K	اندازه پیچ	تائیدیه	محدوده دمایی	زاویه پاشش
پایین زن	۵/۶	۱/۲" NPT	UL, C-UL, FM	۷۹°C	۱۴۰°



شکل ۶: الف) نمایی سه‌بعدی از ساختمان در نرم‌افزار پایروسیم، ب) نمایی سه‌بعدی از هندسه یک واحد در ساختمان، ج) نمایی از واحد از بالا با جزئیات نصب اسپرینکلرها، د) نمای جانبی از یک واحد ساختمان

Fig 6. a) 3D view of the building in Pyrosim software, b) 3D view of the geometry of a unit in the building, c) View of the unit from above with details of sprinklers installation, d) Side view of a building unit

۵-۲- انتشار گازهای سمی و داغ در مجتمع ساختمانی با و بدون اسپرینکلر

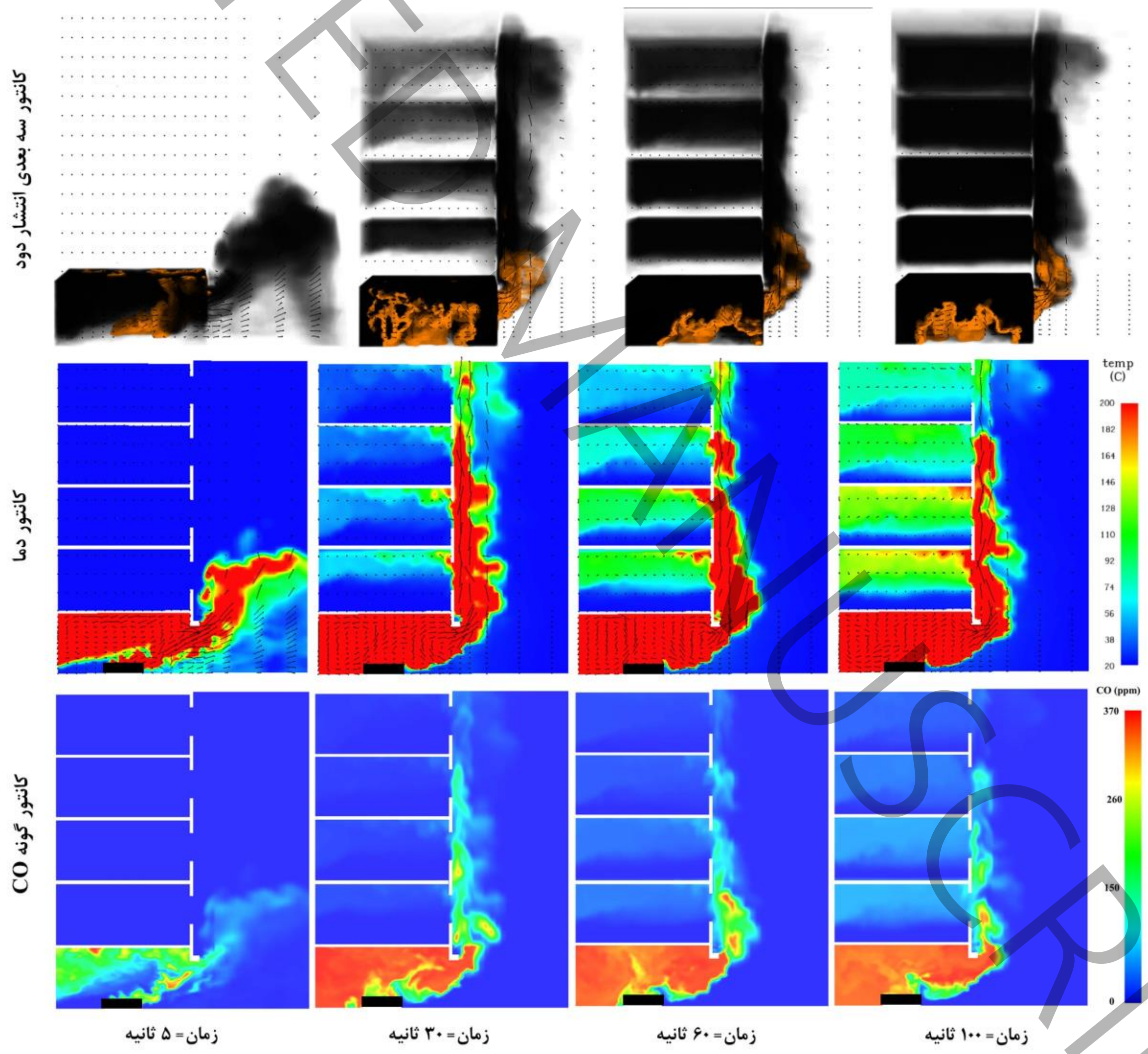
در این مطالعه اثرات دما، رفتار و گسترش دود و گونه سمی و داغ نظیر مونوکسید کربن بررسی و تحلیل شده است. در شکل۷ نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت بدون اسپرینکلر و در شکل ۸ نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت با اسپرینکلر نشان داده شده است. نتایج از زمان اولیه تا ۱۰۰ ثانیه طی چهار زمان؛ اولیه، ۳۰ ثانیه، ۶۰ ثانیه و ۱۰۰ ثانیه نشان داده شده است. همچنین، محدوده دمایی نیز از ۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده که برای تشخیص و بهتر دیده شدن در بازه ۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرداوری شده است. در حالت اولیه درون اتاق از هوای استاندارد و کامل پر بوده است در ادامه سوخت هپتان با مخلوط شدن با اکسیژن هوا فرایند احتراق را تکمیل کرده است و گازهای داغ حاصل از احتراق که چگالی پایین‌تر از هوای تازه دارند به سمت سقف اتاق منتقل می‌شوند. به‌تدریج این اتفاق باعث تشکیل یک‌لایه‌ای از گازهای داغ را در نزدیکی سقف اتاق می‌دهد که عمق این لایه به خروجی درب اتاق رسیده و باعث نشر به طبقات بالاتر و محیط مجاور ساختمان می‌شود.

هنگامی‌که لایه‌ای از گازهای داغ به درب اتاق برسد، به علت اختلاف فشاری که بین گازهای لایه داغ و محیط اطراف وجود دارد، به سمت بیرون اتاق منحرف‌شده و از اتاق خارج می‌شود که این امر در شکل۷ و ۸ به‌وضوح مشخص شده است. باگذشت زمان، ارتفاع لایه دود بیشتر شده تا مرحله‌ای که دیگر روند پیشروی آن ثابت می‌شود. با ثابت شدن مقدار ارتفاع لایه دود، آتش در اتاق به یک حالت شبه‌پایدار رسیده و تغییراتی در رفتار متوسط آتش دیده نمی‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

از زمان ۵ ثانیه به بعد این محصولات احتراق به‌سرعت به فضاهای داخلی سایر اتاق‌ها رسیده که هرچه زمان بیشتر شده مقدار این محصولات نیز به بالاترین حد خود رسیده است. طبق کانتور دما شکل ۷، در زمان ۳۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در زمان ۶۰ ثانیه نفوذ حرارت بیشتر از زمان‌های اولیه در سایر طبقات دیده می‌شود؛ بطوریکه در طبقه دوم حرارت در حدود ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده و در طبقه سوم و چهارم به ترتیب دمای کمتری به ثبت رسیده است. این نتیجه نشان می‌دهد هرچه طبقات از اتاق آتش فاصله گرفته است، دمای کمتری داشته و مخاطره کمتری را به دنبال دارد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که زبانه‌های آتش تا طبقه سوم نیز رسیده و ازنظر عرضی بعد از پایداری تا یک متر جلوی درب اتاق پیشروی داشته است.

با توجه به کانتور مونوکسید کربن که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، از زمان شروع فرایند احتراق تا زمان ۳۰ ثانیه به‌تدریج مقدار مونوکسید کربن در اتاق افزایش پیدا کرده است؛ به طوریکه این مقدار در زمان ۳۰ ثانیه به بیشترین حد خود یعنی ۳۷۰ ppm رسیده است و باگذشت زمان این مقدار در اتاق سوم به روند تقریباً ثابت می‌رسد. در زمان ۱۰۰ ثانیه مقدار مونوکسید کربن در طبقات اول و دوم مقدار ۷۵ ppm و طبقات سوم و چهارم کمتر از ۵۰ ppm گزارش شده است.



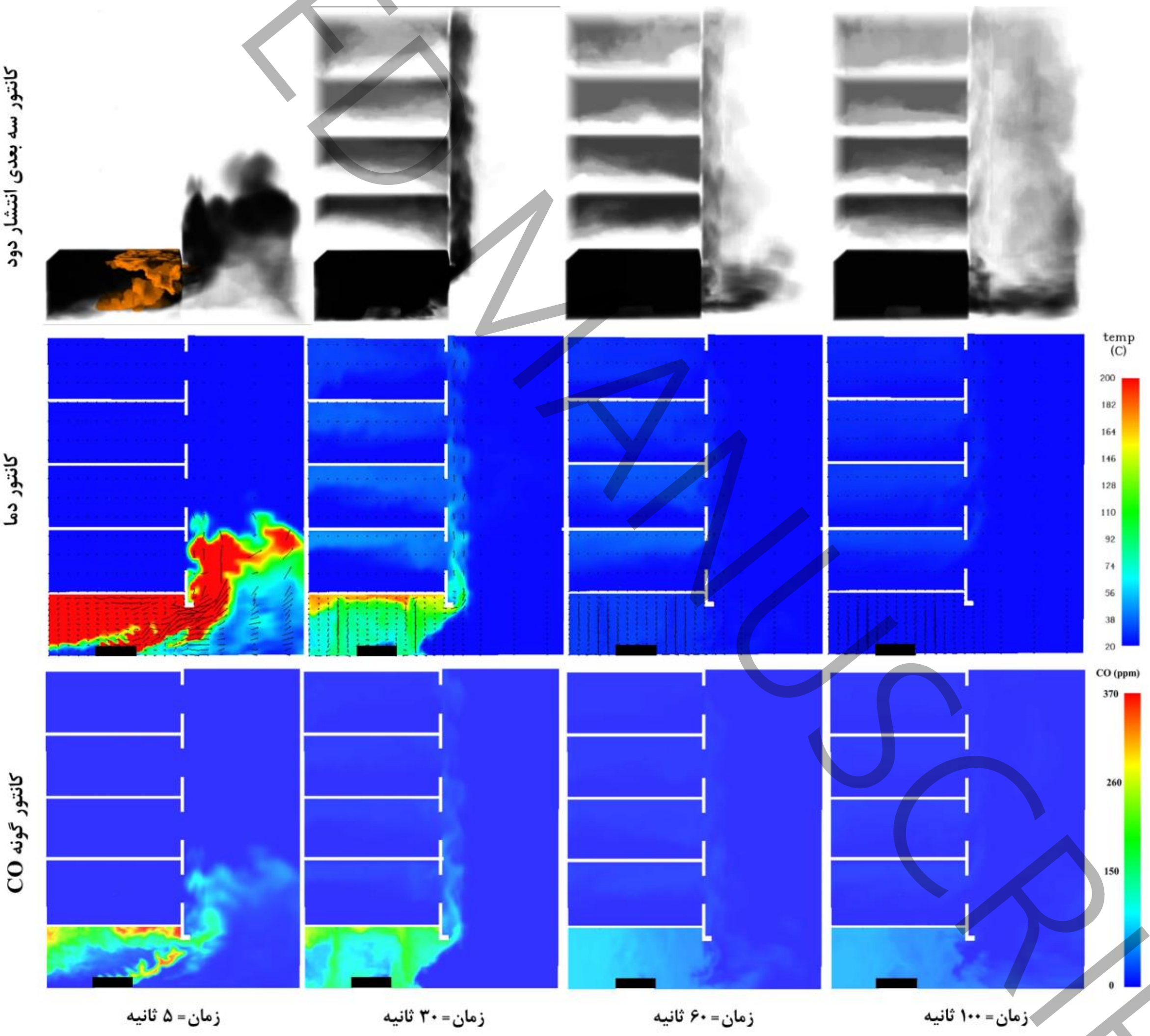
شکل ۷: نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت بدون اسپرینکلر

Fig 7. The results of the spread of smoke and toxic and hot gases in the floors of the building without sprinklers

ACCEPTED MANUSCRIPT

در حالت دوم این مطالعه، باهدف بررسی و تحلیل استفاده از سیستم اطفای حریق اسپرینکلر و روند خاموشی آن انجام شده است که در شکل ۸ نتایج آن مشاهده می‌شود. سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در زمان ۱۰ ثانیه فعال‌سازی شده است. رفتار و چگونگی توسعه حریق همانند حالت قبل بوده و از زمان ۱۰ ثانیه به بعد است که از حالت قبل متفاوت می‌شود. تا ۱۰ ثانیه بعد از فعال‌سازی اسپرینکلر، همچنان آتش فعال است به همین علت در شکل ۸ مشاهده می‌شود که اگرچه در زمان ۳۰ ثانیه، دما کاهش‌یافته و کنترل پیک حرارت حریق انجام شده است؛ اما همچنان در این زمان حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست‌آمده است (البته لازم به ذکر است که در زمان ۳۰ ثانیه همچنان دمای اتاق آتش نزدیک ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد است؛ اما خاموشی آتش قبل از این زمان اتفاق افتاده است).

باگذشت زمان، قبل از ۶۰ ثانیه، آتش خاموش شده است؛ اما گازهای سمی و داغ در اتاق‌ها باقی‌مانده که بعد از خاموشی آتش به‌تدریج از اتاق‌ها خارج می‌شوند. در زمان ۶۰ و ۱۰۰ ثانیه اطفای حریق و خنک‌سازی اتاق آتـش نیز مشاهده می‌شود که از گسترش آتش به طبقات بعدی نیز جلوگیری شده است و به همین علت مشاهده می‌شود که دما و گونه‌های سمی در اتاق‌های بالای اتاق آتش خیلی کمتر از حالت بدون اسپرینکلر است. به‌نحوی‌که مقدار مونوکسید کربن موجود در اتاق طبقه آخر (در زمان ۱۰۰ ثانیه) مقدار کمتر از ppm ۱۰ دارد.



شکل ۸: نتایج انتشار دود و گازهای سمی و داغ در طبقات ساختمان در حالت با اسپرینکلر

Fig 8. The results of the spread of smoke and toxic and hot gases in the floors of the building in the case of sprinklers

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵-۳- حالت بحرانی گازهای داغ و سمی

به‌منظور بررسی اثر گازهای سمی و داغ آتش، نیاز به شاخصی معتبر برای سنجش این موارد است. استاندارد اداره ایمنی و بهداشت حرفه‌ای یکی از مؤسسات معتبر در زمینه ارائه این شاخص‌ها است که مقدار بحرانی کمینه گونه سمی دی‌اکسید کربن را ppm ۵۰۰۰ و مونواکسید کربن را ppm ۲۵-۵۰ گزارش کرده است [۴۱]. هم‌چنین دمای بحرانی برای شروع مخاطرات گازهای داغ برای انسان، ۳۸۸ کلوین گزارش شده است [۲۴].

۵-۴- تغییرات گازهای داغ و سمی در مجتمع ساختمانی

با داشتن حد بحرانی گازهای حاصل از آتش، می‌توان هر یک از اتاق‌های طبقات بالایی اتاق آتش را ازنظر میزان مخاطره بررسی کرد. در جدول ۴ بیشینه مقادیر دما، مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن در حالت بدون اسپرینکلر برای پنج اتاق در طبقات اول تا چهارم آورده شده است. در این جدول که در طول مدت‌زمان ۱۰۰ ثانیه شبیه‌سازی، استخراج شده است، از میزان کمینه و متوسط چشم‌پوشی شده است تا به‌این‌ترتیب بتوان با سخت‌گیری بیشتری مخاطرات آتش برای طبقات بالای آن را بررسی کرد.

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌گردد که دمای بیشینه اتاق‌های شماره ۱ در تمامی طبقات با دمای هوای محیط اطراف تفاوتی ندارد. همچنین دمای بیشینه در اتاق‌های شماره ۵ نیز تفاوت چندانی با محیط اطراف ندارد، به‌نحوی‌که در طبقه چهارم که دمای بیشینه به ۴۰ رسیده است، هیچ‌گونه مخاطره‌ای ایجاد نمی‌کند؛ اما زمانی که اتاق‌های مرکزی (شماره۳) بررسی شود، مشاهده می‌گردد که دمای بیشینه بحرانی می‌شود. به‌عنوان‌مثال در طبقه اول (بالای اتاق آتش) دمای بیشینه اتاق سوم به ۷۷۶ درجه سانتی‌گراد رسیده است. البته در اتاق‌های شماره سوم، هرچه از اتاق آتش فاصله گرفته می‌شود، دمای بیشینه کاهش می‌یابد که در طبقه آخر به ۲۳۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد.

مقادیر بیشینه گازهای سمی مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن نیز رفتاری همچون دمای بیشینه دارد. به این صورت که شرایط گازهای سمی در اتاق‌های شماره ۱ و ۵ در تمامی طبقات با محیط اطراف یکسان است. همچنین مقدار مونوکسید کربن در اتاق‌های ۲ و ۴ نیز کمتر از مقدار بحرانی است و تنها اتاق‌های شماره ۳ هستند که به مقدار بحرانی و بیشتر از آن رسیده‌اند. اگرچه گونه کربن دی اکسید در اتاق‌های ۲ و ۴ (در طبقات دوم و سوم) به مقدار بحرانی رسیده‌اند. در یک جمع‌بندی اتاق‌های شماره سوم اتاق‌هایی هستند که بیشتر از سایر اتاق‌ها در معرض مخاطرات گازهای سمی و داغ قرار می‌گیرند. ازاین‌رو در تحلیل‌های بعدی این اتاق‌ها با تمرکز بیشتری موردبررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۴: بیشینه مقدار دما، کربن مونواکسید و دی‌اکسید کربن در حالت بدون اسپرینکلر (در طول ۱۰۰ ثانیه شبیه‌سازی)

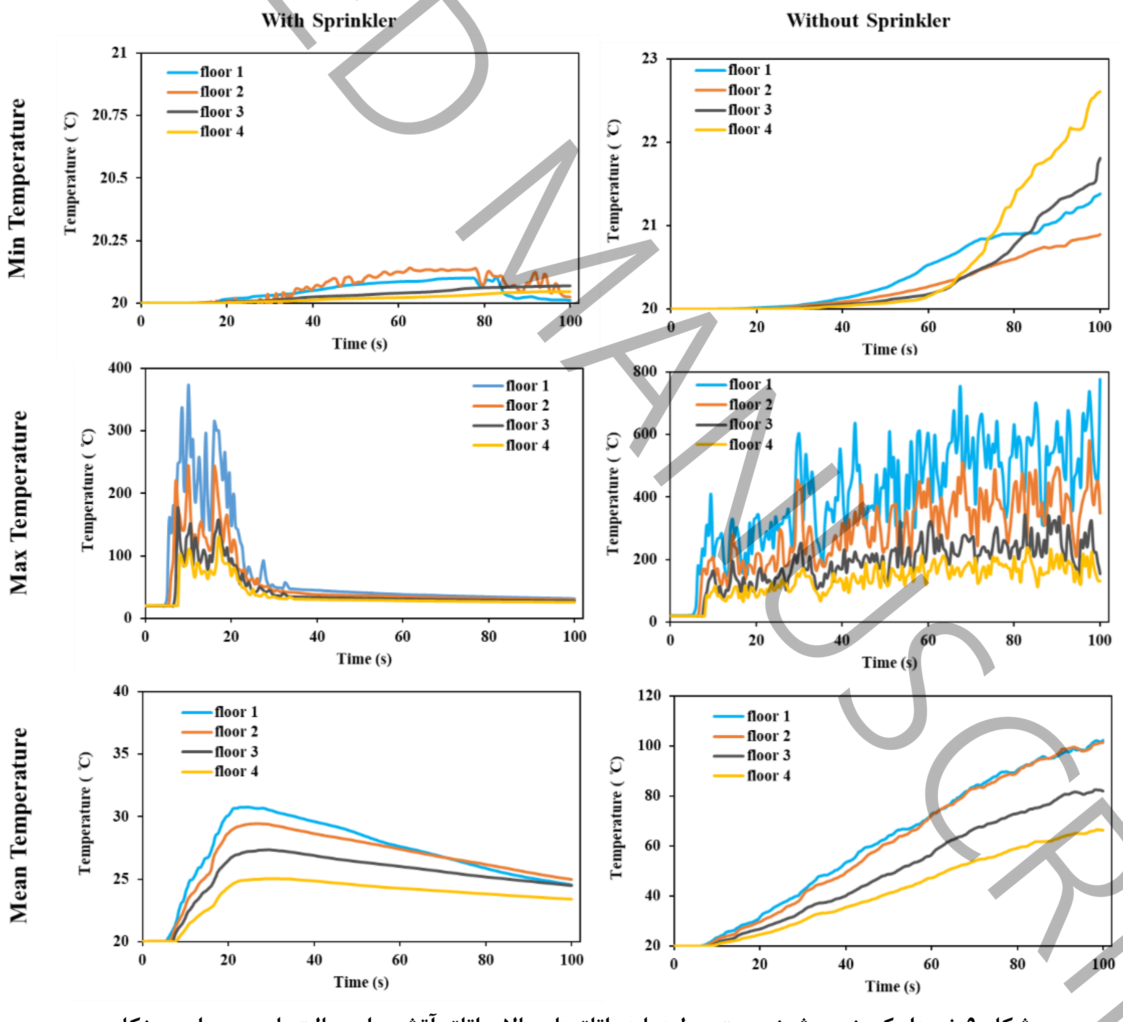
Table 4. The maximum value of temperature, carbon monoxide and carbon dioxide in the case of without_sprinkler (during 100 seconds of simulation)

شماره اتاق (ردیف)	۱			۲			۳			۴			۵		
گونه‌ها (ppm) / طبقات	دما (°C)	CO	CO_2	دما (°C)	CO	CO_2	دما (°C)	CO	CO_2	دما (°C)	CO	CO_2	دما (°C)	CO	CO_2
۱	۲۱/۱	۰	۵۹۱	۴۰	۴/۷۴	۲۹۷	۷۷۶	۲۶۵	۱۳۳۰۰۰	۶۶/۳	۱۵/۷	۸۴۸۰	۲۱	۰	۵۹۱
۲	۲۱/۱	۰	۵۹۱	۱۴۲	۳۳/۸	۱۷۶۰۰	۵۸۱	۱۸۵	۹۳۲۰۰	۱۴۰	۳۱/۵	۱۶۴۰۰	۲۱/۱	۰	۵۹۱
۳	۲۱/۲	۰	۵۹۱	۱۹۷	۵۰/۸	۲۶۱۰۰	۳۴۲	۱۰۴	۵۲۸۰۰	۱۶۸	۴۲/۱	۲۱۷۰۰	۲۱/۱	۰	۵۹۱
۴	۳۵/۴	۰	۵۹۱	۱۷۶	۳۷/۱	۲۴۵۰	۲۳۷	۶۶/۸	۳۴۱۰۰	۱۶۱	۳۸/۹	۲۰۱۰۰	۴۰/۴	۰	۵۹۱

ACCEPTED MANUSCRIPT

با توجه به این نکته که لزوماً مقدار بیشینه گازهای سمی و داغ مخاطره‌آمیز نیستند (چراکه ممکن است مقادیر بیشینه در ورودی پنجره باشد؛ حال‌آنکه افراد مستقر در اتاق، به سمت خروجی درب در حال ترک محل هستند) نیاز است که مقادیر کمینه و متوسط نیز بررسی گردد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر میزان مخاطره آتش در ساختمان چندطبقه موردبررسی، هر یک از اتاق‌های شماره ۳ به‌عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته‌شده و مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط در این اتاق‌ها مطالعه می‌گردد.

در شکل ۹ نمودار توزیع دمای کمینه، بیشینه و متوسط در اتاق‌های شماره ۳ (بالای اتاق آتش) برای حالت با و بدون اسپرینکلر نشان داده شده است. با توجه دمای نمودار کمینه دما در حالت با و بدون اسپرینکلر، می‌توان دریافت که دمای کمینه در حالت بدون اسپرینکلر در محدوده دمایی ۲۰ تا ۲۳ درجه سانتی‌گراد بوده و در حالت با اسپرینکلر این تغییرات در محدوده دمایی ۲۰-۲۰/۲۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است و عملاً دمای کمینه تغییری نکرده است. اما اگر به مقادیر متوسط در این اتاق‌ها دقت شود، مشاهده می‌شود که در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط دما در طبقه اول و دوم به ۳۸۰ کلوین رسیده است که مقدار آن به حد بحرانی رسیده است؛ اگرچه در طبقات ۳ و ۴ به ترتیب به ۳۵۰ و ۳۲۰ کلوین رسیده است و شرایط مخاطره‌آمیزی در این طبقات برقرار نشده است. ضمن اینکه در حالت بدون اسپرینکلر باگذشت زمان، دمای کمینه، بیشینه و متوسط با شیب تقریباً ثابت افزایشی است. اما در حالت با اسپرینکلر، بعد از فعال‌سازی اسپری آب، دما نیز کاهشی می‌شود و نشان‌دهنده تأثیرات مثبت سیستم اطفای حریق اسپرینکلر است.



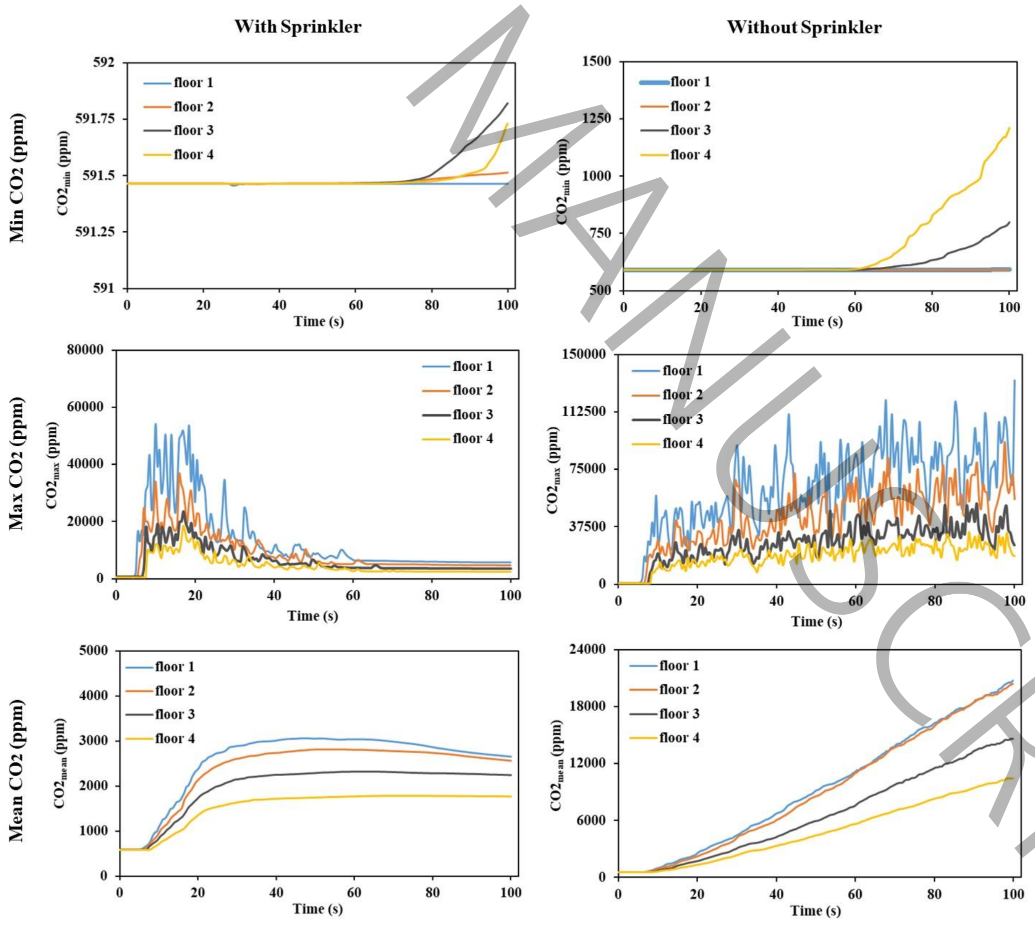
شکل ۹: نمودار کمینه، بیشینه و متوسط دما در اتاق‌های بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر

Fig 9. Curve of minimum, maximum and mean temperature in the rooms above the fire room for the case of with_ and without_sprinklers

ACCEPTED MANUSCRIPT

حداکثر دما در هر دو حالت مربوط به طبقه اول بوده که در حالت بدون اسپرینکلر تا نزدیک ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و با تأثیر اسپرینکلر دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است. طبقات دوم الی چهارم به ترتیب دمای کمتری را به ثبت رسانده‌اند؛ زیرا حرارت به طبقات بالاتر کمتر منتشر شده است. دمای متوسط در حالت بدون اسپرینکلر در طبقات اول و دوم ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و در طبقات سوم و چهارم به ترتیب ۸۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد و در حالت با اسپرینکلر حداکثر در ۲۰ ثانیه بیشترین مقدار مربوط به طبقه اول و دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است. ازاین‌رو در یک جمع‌بندی، با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما، می‌توان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاق‌ها پی برد.

با مدنظر قرار دادن حد بحرانی ۵۰۰۰ ppm، نمودار توزیع گونه دی‌اکسید کربن در شرایط کمینه، بیشینه و متوسط در اتاق‌های شماره ۳ در بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در حالت بدون اسپرینکلر کمینه مقدار دی اکسید کربن در تمامی طبقات تا زمان ۶۰ ثانیه، ۵۹۱ ppm است که این مقدار ناشی از دی‌اکسید کربن موجود در هواست و این مقدار در طبقات اول و دوم به‌صورت ثابت تا ۱۰۰ ثانیه ادامه داشته است؛ اما در طبقات سوم و چهارم این مقدار افزایش‌یافته، به‌نحوی که به ترتیب ۷۶۰ و ۱۲۰۰ ppm است؛ اما در حالت با اسپرینکلر تا زمان ۸۰ ثانیه، مقدار ۵۹۱/۴ ppm به‌صورت ثابت برای همه طبقات بوده است؛ ولی در طبقات سوم و چهارم به علت گسترش ناحیه‌ی پلوم آتش، مقداری افزایشی شده است. البته مقادیر بیشینه دی‌اکسید کربن در حالت بدون اسپرینکلر به ۱۱۲۵۰۰ ppm نیز رسیده است. این در حالی است که مقدار بیشینه در حالت با اسپرینکلر حداکثر به ۵۰۰۰۰ ppm رسیده است. اما پارامتر مهم‌تر از کمینه و بیشینه، مقدار متوسط است که با توجه به این مقدار در شکل ۱۰، در تمامی طبقات در حالت با اسپرینکلر، کمتر از حد بحرانی است. این در صورتی است که در حالت بدون اسپرینکلر در تمامی طبقات حالت بحرانی حاکم شده است.

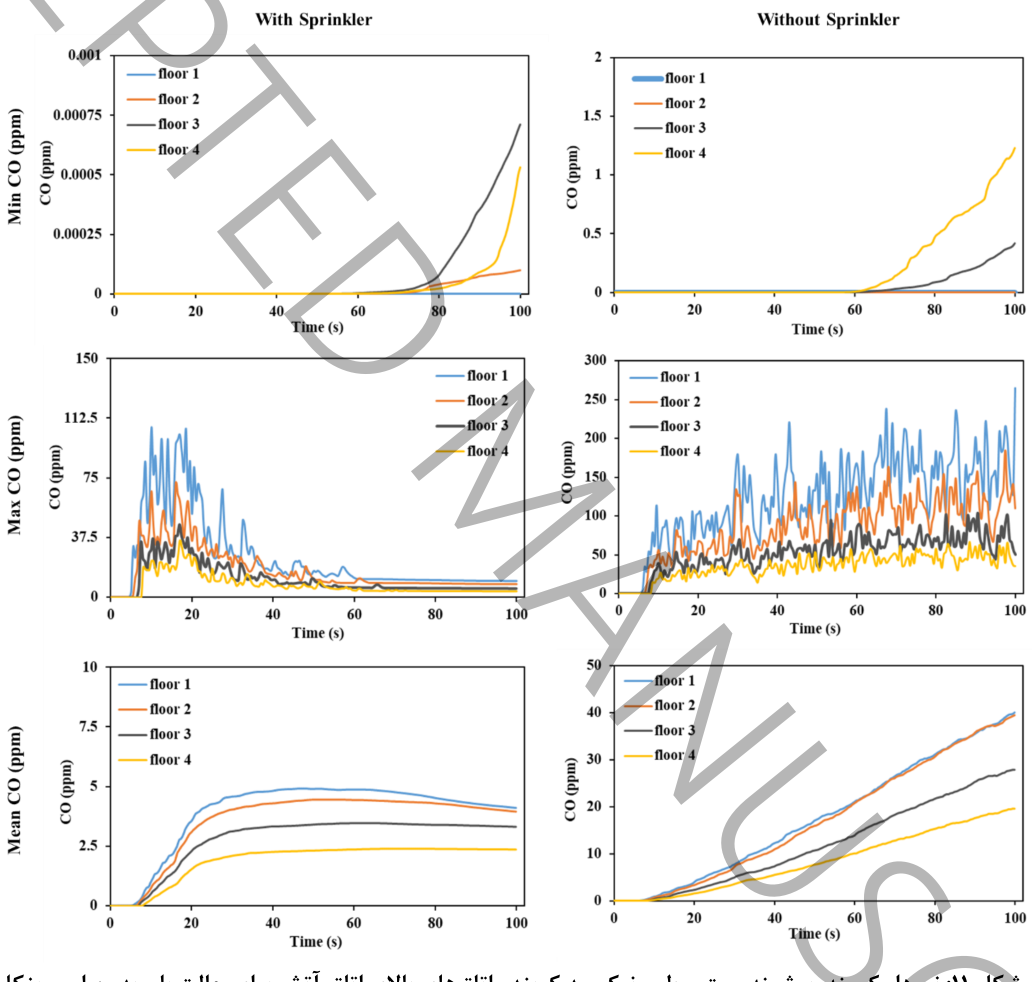


شکل ۱۰: نمودار کمینه، بیشینه و متوسط دی‌اکسید کربن در اتاق‌های بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر

Fig 10. Curve of minimum, maximum and mean CO_2 in the rooms above the fire room for the case of with_ and without_sprinklers

ACCEPTED MANUSCRIPT

در شکل ۱۱ نتایج کمینه، بیشینه و متوسط مونوکسید کربندر اتاق‌های بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر ترسیم شده است. با مدنظر قرار دادن مقدار صفر مونوکسید کربنموجود در هوا، کمینه، بیشینه و متوسط این گونه سمی همگی از صفر شروع شده‌اند و باگذشت زمان زیاد شده‌اند. مقدار کمینه در دو حالت با و بدون اسپرینکلر در اتاق‌ها نزدیک صفر است (اگرچه در حالت بدون اسپرینکلر به حداکثر ۱ ppm رسیده است)؛ اما مقدار بیشینه در حالت با اسپرینکلر سه برابر حد بحرانی (۵۰ ppm) رسیده است؛ درحالی‌که در حالت با اسپرینکلر، تنها در طبقه اول از مقدار بحرانی بیشتر شده است و از طرفی مقدار متوسط نیز در تمام طبقات حالت با اسپرینکلر کمتر از حد بحرانی است. به‌این‌ترتیب می‌توان گفت که طبقات بالای اتاق آتش ازنظر مونوکسید کربندر مخاطره‌ی خاصی قرار نمی‌گیرند. اما در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط در تمام طبقات صعودی بوده و به حد بحرانی نزدیک می‌شوند که اگر زمان بیشتری به آن داده می‌شد، قطعاً از حالت بحرانی بیشتر خواهد شد.



شکل ۱۱: نمودار کمینه، بیشینه و متوسط مونوکسید کربندر اتاق‌های بالای اتاق آتش برای حالت با و بدون اسپرینکلر

Fig 11. Curve of minimum, maximum and mean CO in the rooms above the fire room for the case of with_ and without_sprinklers

در جدول ۵ زمان رسیدن به حالت بحرانی برای دما، گازهای داغ و سمی در تمام طبقات و در تمام اتاق‌ها آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، اتاق‌های ۱ و ۵ در تمامی طبقات در معرض خطر خاصی از ورود گازهای سمی و داغ قرار نمی‌گیرند. البته باید دقت داشت که این تحلیل برای حالتی است که مجتمع ساختمانی در معرض باد قرار نگیرد (چراکه باد می‌تواند جهت پلوم آتش را منحرف سازد و سایر اتاق‌ها را نیز در معرض مخاطره قرار دهد). گاز داغ و سمی کربن مونواکسید نیز مخاطره‌ای برای اتاق‌های ۲ و ۴ ندارد؛ اما گاز دی‌اکسید کربن می‌تواند در برخی از طبقات مخاطره ایجاد کند به‌عنوان مثال اتاق ۲ طبقه ۲ و ۳ و یا اتاق ۴ در تمام طبقات در معرض این مخاطره هستند. اما اتاق‌های شماره ۳ در تمامی طبقات در معرض مخاطره گازهای سمی

ACCEPTED MANUSCRIPT

(به‌خصوص دی‌اکسید کربن) و داغ قرار می‌گیرند که حداقل بعد از ۶ ثانیه این اتفاق می‌افتد و ازاین‌رو با صراحت می‌توان بیان داشت که درصورتی‌که در این مجتمع (با این مقدار نرخ آزادسازی حرارت)، از اسپرینکلر استفاده نشود، تمام اتاق‌های بالای اتاق آتش در معرض مخاطره قرار می‌گیرند و بالعکس اگر از اسپرینکلر استفاده شود، تمام طبقات از حالت بحرانی گازهای سمی و داغ ایمن می شوند.

جدول ۵: زمان رسیدن به حالت بحرانی برای دما، گازهای داغ و سمی برای حالت بدون اسپرینکلر

Table 5. Time to reach the critical state for temperature, hot and toxic gases for the state without sprinklers

شماره اتاق (ردیف)	۱			۲			۳			۴			۵		
طبقات	دما	CO	CO_2	دما	CO	CO_2	دما	CO	CO_2	دما	CO	CO_2	دما	CO	CO_2
۱	–	–	–	–	–	–	۶ ثانیه	۹ ثانیه	۶ ثانیه	–	–	۲۰ ثانیه	–	–	–
۲	–	–	–	۷۵ ثانیه	–	۲۰ ثانیه	۷ ثانیه	۱۴ ثانیه	۷ ثانیه	۱۰۰ ثانیه	–	۱۲ ثانیه	–	–	–
۳	–	–	–	۴۴ ثانیه	–	۹ ثانیه	۸ ثانیه	۱۰ ثانیه	۸ ثانیه	۹۸ ثانیه	–	۱۱ ثانیه	–	–	–
۴	–	–	–	۴۵ ثانیه	–	–	۱۱ ثانیه	۴۵ ثانیه	۹ ثانیه	۶۴ ثانیه	–	۱۰ ثانیه	–	–	–

۶- جمع‌بندی

با روند رشد و گسترش حریق و پدیده‌های مختلفی نظیر فلش‌آور و بک درفت در اتاق، حجم محصولات احتراق، گازهای سمی و دود افزایش پیدا کرده و به سمت طبقات بالاتر و اتاق‌های مجاور حرکت و سرایت می‌کند. عدم بررسی اثر سیستم اطفای حریق آبی در کنترل و خاموشی حریق در ساختمان چندطبقه به‌منظور عدم نشر گازهای سمی و داغ به طبقات بالا، یکی از خلأهای مطالعات پیشینه است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این موضوع، در این پژوهش در گام نخست رشد و گسترش آتش در ساختمان در فضای داخلی ساختمان با قرار دادن منبع سوخت در مرکز اتاق در طبقه همکف، بدون استفاده از سیستم اطفای حریق بررسی شده و در گام دوم تأثیر سیستم اطفای حریق اسپرینکلر در کنترل حریق و جلوگیری از نشر گازهای سمی و دود در طبقات بالاتر و مجاور تحلیل و مقایسه شده است. این نتایج شامل موارد زیر است:

۱- با صحت سنجی نتایج مشخص شد؛ نتایج عددی و تجربی بر یکدیگر مطابقت خیلی خوبی دارند به‌نحوی‌که مقدار خطا کمتر از ۱۰ درصد است و حتی نواحی بیشینه و کمینه شدن را نیز به‌خوبی توانسته است که مدل کند. همچنین در شبیه‌سازی حاضر مدت‌زمان خاموشی ۲/۷ ثانیه است که در مقایسه بازمان تجربی که ۲/۵ ثانیه است، کمتر از ۱۰ درصد خطای نسبی دارد که قابل‌قبول است.

۲- با توجه به نتایج دما و گونه‌های سمی در حالت بدون اسپرینکلر مشاهده شد؛ در زمان ۱۰۰ ثانیه شرایط دمایی در اتاق سوم طبقه اول به دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده است در طبقه سوم و چهارم به ترتیب دمای کمتری به ثبت رسیده است. این نتیجه نشان می‌دهد هرچه طبقات از اتاق آتش فاصله گرفته است، دمای کمتری داشته و مخاطره کمتری را به دنبال دارد. همچنین، مقدار مونوکسید کربن در زمان ۱۰۰ ثانیه در طبقات اول و دوم، به ترتیب مقادیر ۲۲۰ و ppm ۱۷۵ و در طبقات سوم و چهارم کمتر از ppm ۱۰۰ گزارش شده است. در حالت با اسپرینکلر باگذشت زمان، قبل از ۲۰ ثانیه، آتش خاموش شده است؛ اما گازهای سمی و داغ در اتاق‌ها باقی‌مانده که بعد از خاموشی آتش به‌تدریج از اتاق‌ها خارج می‌شوند.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳- با مدنظر قرار دادن مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط دما، می‌توان به اهمیت اسپرینکلر در خاموشی آتش در اتاق آتش و کنترل گازهای سمی و داغ در سایر اتاق‌ها پی برد. می‌توان گفت که در حالت با اسپرینکلر، طبقات بالای اتاق آتش از نظر کربن مونواکسید در مخاطره‌ی خاصی قرار نمی‌گیرند؛ اما در حالت بدون اسپرینکلر، مقدار متوسط در تمام طبقات صعودی بوده و به حد بحرانی نزدیک می‌شوند که اگر زمان بیشتری به آن داده می‌شد، قطعاً از حالت بحرانی بیشتر می‌شود. همچنین مقدار متوسط گونه دی‌اکسید کربن در تمامی طبقات حالت با اسپرینکلر، کمتر از حد بحرانی است.

منابع

[1] M. McNamee, B. Meacham, P. van Hees, L. Bisby, W. Chow, A. Coppalle, R. Dobashi, B. Dlugogorski, R. Fahy, C. Fleischmann, IAFSS agenda 2030 for a fire safe world, Fire Safety Journal, 110 (2019) 102889.
[2] I. Ioannou, W. Aspinall, D. Rush, L. Bisby, T. Rossetto, Expert judgment-based fragility assessment of reinforced concrete buildings exposed to fire, Reliability Engineering & System Safety, 167 (2017) 105-127.
[3] M. Altın, M.F. Kılıçarslan, Two real room fire and the evaluation of its consequences in terms of fire safety, Case Studies in Thermal Engineering, 44 (2023) 102876.
[4] M. Mapar, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Numerical Investigation of Two Simultaneous Fires in a Tunnel and Evaluation of the Obstructive Influence of Vehicles by Large Eddy Simulation, Modares Mechanical Engineering, 13(15) (2014) 10-22, (in Persian).
[5] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Air curtain to control smoke and fire spread in a ventilated multi-floor building, International Journal of Thermal Sciences, 159 (2021) 106612.
[6] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, The effect of vertical and horizontal air curtain on smoke and heat control in the multi-storey building, Journal of Building Engineering, 40 (2021) 102347.
[7] D.J. Pesic, D.N. Zigar, I. Anghel, S.M. Glisovic, Large Eddy Simulation of wind flow impact on fire-induced indoor and outdoor air pollution in an idealized street canyon, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 155 (2016) 89-99.
[8] R.K. Janardhan, S. Hostikka, Experiments and numerical simulations of pressure effects in apartment fires, Fire technology, 53(3) (2017) 1353-1377.
[9] D. Cortés, D. Gil, J. Azorín, F. Vandecasteele, S. Verstockt, A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires, Applied Sciences, 10(16) (2020) 5609.
[10] G. Heidarinejad, H. Tajaddod, M. Safarzadeh, Numerical study of the effect of the water mist nozzle location on fire extinguishing system in shielded fire, Fuel and Combustion, 15(4) (2023) 1-19, (in Persian).
[11] G. Heidarinejad, E. Mousavi, Numerical simulatoin of poolfire suppression using water mist system investigating nozzle parameter effects, Modares Mechanical Engineering, 17(2) (2017) 350-358, (in Persian).
[12] X. Ye, J. Ma, Y.-x. Shen, L.-y. Lin, Suppression effect of sprinkler system on fire spread in large commercial buildings, Procedia Engineering, 135 (2016) 455-462.
[13] C. Fan, R. Bu, X. Xie, Y. Zhou, Full-scale experimental study on water mist fire suppression in a railway tunnel rescue station: Temperature distribution characteristics, Process Safety and Environmental Protection, 146 (2021) 396-411.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[14] R. Bellas, M.A. Gómez, A. González-Gil, J. Porteiro, J.L. Míguez, Assessment of the fire dynamics simulator for modeling fire suppression in engine rooms of ships with low-pressure water mist, Fire Technology, 56(3) (2020) 1315-1352.
[15] Y. Yuan, S. Wu, B. Shen, A numerical simulation of the suppression of hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist, International Journal of Hydrogen Energy, 46(24) (2021) 13353-13364.
[16] P. Nonsawat, S. Patvichaichod, Performance analysis of automatic sprinkler systems in warehouses using fire dynamic simulation, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, pp. 012005.
[17] L. Yinshui, J. Zhuo, W. Dan, L. Xiaohui, Experimental research on the water mist fire suppression performance in an enclosed space by changing the characteristics of nozzles, Experimental thermal and fluid science, 52 (2014) 174-181.
[18] Y. Liu, X. Wang, T. Liu, J. Ma, G. Li, Z. Zhao, Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist, Process Safety and Environmental Protection, 141 (2020) 344-354.
[19] M. Bromann, The Design and Layout of Fire Sprinkler Systems, CRC Press, 2001.
[20] M. Ahrens, US Experiences with Sprinklers. National Fire Protection Association, in, NFPA Research, Data and Analytics Division, 2017.
[21] S.A. Abdulrahman, K. Chetehouna, A. Cablé, Ø. Skreiberg, M. Kadoche, A review on fire suppression by fire sprinklers, Journal of Fire Sciences, 39(6) (2021) 512-551.
[22] H. Liu, C. Wang, I.M.D.C. Cordeiro, A.C.Y. Yuen, Q. Chen, Q.N. Chan, S. Kook, G.H. Yeoh, Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems, Journal of Building Engineering, 28 (2020) 100999.
[23] Y. Wang, K.V. Meredith, X. Zhou, P. Chatterjee, Y. Xin, M. Chaos, N. Ren, S.B. Dorofeev, Numerical simulation of sprinkler suppression of rack storage fires, Fire Safety Science, 11 (2014) 1170-1183.
[24] M. Safarzadeh, G. Heidarinejad, H. PasdarShahri, Numerical investigation of compartment fire under maximum and minimum of natural ventilation using flamelet generated manifold combustion model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(5 (Special Issue)) (2021) 3335-3350, (in Persian).
[25] S.B. Pope, PDF methods for turbulent reactive flows, Progress in energy and combustion science, 11(2) (1985) 119-192, (in Persian).
[26] S. Subramaniam, Lagrangian–Eulerian methods for multiphase flows, Progress in Energy and Combustion Science, 39(2-3) (2013) 215-245.
[27] G. Maragkos, B. Merci, Large eddy simulations of CH 4 fire plumes, Flow, Turbulence and Combustion, 99 (2017) 239-278.
[28] H. Pasdarshahri, G. Heidarinejad, K. Mazaheri, Development of Compatible Subgrid Scale Model of LES in Numerical Simulation of Compartment Fires, Ph. D. Thesis, Tehran, Tarbiat Modares University, 2013, (in Persian).
[29] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide, validation, vol. 3, NIST, Spec. Publ, (2010) 1018-1015.
[30] T. Myers, A. Trouvé, A. Marshall, Predicting sprinkler spray dispersion in FireFOAM, Fire safety journal, 100 (2018) 93-102.
[31] R.L. Alpert, Numerical modeling of the interaction between automatic sprinkler sprays and fire plumes, Fire Safety Journal, 9(2) (1985) 157-163.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[32] P. Valdes, T. Beji, B. Merci, CFD Study on the Interaction between Water Sprays and Longitudinal Ventilation in Tunnel Fires, Master's Thesis, Belgium, Ghent University, 2018.
[33] Z.Q. Yang, S.H. Chen, X.J. Zhu, Simulation Research of the Suppressing Performance of Mist to Pool Fire in Room with Blocks, Advanced Materials Research, 518 (2012) 937-941.
[34] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, K. Overholt, Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model, NIST special publication, 1018(1) (2013) 175.
[35] T.-S. Shen, Y.-H. Huang, S.-W. Chien, Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene, Building and environment, 43(6) (2008) 1036-1045.
[36] J. Zhang, Y. Tao, X. Liu, H. Zhao, Fire simulation research on a bus based on Pyrosim, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2020, pp. 012100.
[37] J. Lee, Numerical analysis of how ventilation conditions impact compartment fire suppression by water mist, Annals of Nuclear Energy, 136 (2020) 107021.
[38] J. Lee, Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening, Nuclear Engineering and Technology, 51(2) (2019) 410-423.
[39] K.B. McGrattan, H.R. Baum, R.G. Rehm, A. Hamins, G.P. Forney, J.E. Floyd, S. Hostikka, K. Prasad, Fire dynamics simulator (version 4) technical reference guide, NIST special publication, 1018 (2004) 94.
[40] Dreisbach and K. Hill, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications Volume 3 Fire Dynamics Tools (FDT), (2007) no. C.
[41] https://nj.gov/health/workplacehealthandsafety/right-to-know/, official site of the state of new jersey, 2023.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Numerical study of the spread of toxic and hot fire gases in a multi-storey residential complex with and without sprinkler fire extinguishing system

Hamid Tajaddod, Ghassem heidarinejad[1], Mohammad Safarzadeh

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, the effect of a water-based fire suppression system on fire control and extinguishment in a multi-story building was investigated using FDS software. The geometry consisted of a five-story building with a total of 25 units, where the fire room with heptane fuel was located on the third floor in the center of the ground floor room. Temperature parameters and species such as carbon monoxide and carbon dioxide were measured in each room, and the results were analyzed for two conditions with and without sprinklers from the start of combustion to 100 seconds. Validation showed that the numerical results of this study had an 8% relative error compared to experimental results. Additionally, in the condition without sprinklers, the temperature in the third-floor fire room reached 700 degrees Celsius within 30 seconds, but with sprinklers, extinguishment occurred in less than 20 seconds. This behavior also occurs for toxic species such as carbon monoxide and carbon dioxide, which are at risk in all floors above the fire room without sprinklers. Therefore, by considering minimum, maximum, and average values, the importance of sprinklers in extinguishing fires in the room and controlling toxic and hot gases in other rooms can be concluded.

KEYWORDS

Building Fire, FDS software, sprinkler fire extinguishing system, toxic and hot gases, fire control

[1] Corresponding Author: Email: gheidari@modares.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT