



## پروفیل دما و پخش دود ناشی از حریق در پارکینگ یک مجتمع تجاری با نرم‌افزار پیروسیم

فاطمه بهبهانی<sup>۱</sup>، مهدی حمزه‌ای<sup>۲\*</sup>، زهرا مهردوست<sup>۲</sup>، محمد مقیمان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

\* نویسنده مسول: Mahdi\_Hamzei@iauhvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از فضای پارکینگ در ساختمان‌های بزرگ رواج یافته است. یکی از خطراتی که همواره ساختمان‌ها را تهدید می‌کند، خطر حریق می‌باشد. پس از وقوع حریق، دود تولید می‌گردد و دود ایجاد شده در اثر حریق خطر بیشتری نسبت به آتش، برای جان افراد به دنبال دارد. با کنترل دود می‌توان از ساختمان و افراد ساکن در آن محافظت نمود و خسارت‌های ناشی از حریق را کاهش داد. در این پژوهش پخش دود و پروفیل دما در پارکینگ یک مجتمع تجاری با استفاده از نرم‌افزار پیروسیم، مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل از معادلات ناویراستوکس، انرژی، بقاء جرم و برای آشفتگی از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده گردید. دو سناریو برای بررسی حریق در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول پارکینگ بدون سیستم تهویه و در سناریوی دوم همراه با سیستم تهویه مورد مطالعه قرار گرفت. از فن تخلیه دود برای خروج دود از فضا و از فن تزریق هوا برای تامین هوای تازه استفاده شد. نتایج این دو شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه گردید که در آن قدرت حریق مورد بررسی ۴ مگاوات در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد در سناریوی اول میزان غلظت دود ۰/۰۰۳ مول بر مول و دما ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در سناریوی دوم میزان غلظت دود ۰/۰۰۲ مول بر مول می‌شود که نسبت به سناریوی اول ۹۳٪ بهبود یافت. همچنین دما با تخلیه دود در زمان ۱۲۰۰ ثانیه به ۲۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در واقع دما نسبت به سناریوی اول ۶۵٪ بهبود یافت. کاهش غلظت دود و کاهش دما موجب تخلیه آسان‌تر افراد در هنگام حریق می‌شود.

**کلمات کلیدی:** حریق، کنترل دود، غلظت دود، پروفیل دما، نرم‌افزار پیروسیم.

### مقدمه

با توسعه تکنولوژی، ساختمان‌های تجاری در جوامع امروزی محبوبیت بسیاری پیدا کرده‌اند. این شرایط زندگی را راحت‌تر می‌کند، اما خطرات جدیدی مانند آتش‌سوزی‌های بزرگ را به همراه دارد. این امر به این دلیل است که ساختمان تجاری بزرگ معمولاً دارای فضای داخلی زیادی است. کالاهای قابل اشتعال در داخل نوع خاصی از توزیع سوخت را تشکیل می‌دهند. در صورت آتش‌سوزی، حریق با سرعت بالایی در این نوع ساختمان‌ها گسترش می‌یابد. با توجه به سرعت حریق جان انسان‌های موجود در ساختمان به خطر می‌افتد. به همین خاطر برای کاهش تلفات جانی و مالی در چنین ساختمان‌هایی بررسی عوامل موثر در گسترش حریق بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱]. بنا به توسعه شهری و فضای محدود، ساخت پارکینگ‌ها در مجتمع‌های تجاری و مسکونی رواج یافته است. آگروز ماشین حاوی چندین گاز خطرناک از جمله کربن مونوکسید می‌باشد. در پارکینگ‌ها در اثر گازهای خروجی از آگروز خودروها، هوا به شدت آلوده می‌شود [۲]. اگر در این پارکینگ‌ها حریق اتفاق بیفتد علاوه بر گازهای سمی حاصل از وسایل نقلیه، دود ناشی از حریق که شامل گازهای سمی هم‌چون کربن مونوکسید است موجب تلفات انسانی می‌گردد. به همین دلیل بررسی حریق در پارکینگ‌ها و شبیه‌سازی دود بسیار اهمیت دارد. هدف از شبیه‌سازی حریق، حفظ ایمنی ساکنین به منظور جلوگیری از تلفات، در زمان حریق می‌باشد. احتراق علاوه بر گرما و دود، گازهایی نیز تولید می‌کند. حجم گازهای داغ در یک فضای بسته به سرعت بالا رفته و تمام اتاق را پر می‌کنند. اثرات بلند مدت ناشی از قرار گرفتن در معرض دود و حرارت بر بدن انسان مسئله بسیار مهمی است [۳]. پیترانو و پنایتسکو [۴]، حریق جت فن‌های موجود در پارکینگ خودرو بسته با نرم‌افزار پیروسیم را مورد بررسی قرار دادند. هدف شبیه‌سازی، ثبت دمای سه نقطه زیر سقف پارکینگ خودرو در هنگام حریق جت فن بود. در این پژوهش گردش دود بعد از حریق و دمای ۳ نقطه برای ۵ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش دمای هوا و سطوح، غلظت اکسیژن، گازهای حاصل از احتراق،



فشار در نقاط مختلف، حرکت دود و گرادیان دما و فشار بودند. با توجه به دماهای ثبت شده مشخص شد، در ابتدا دما بالا می‌رود و سپس بعد از گذشت ۲/۵ دقیقه دما کاهش می‌یابد.

ژانگ و همکاران [۵]، یک روش پیش‌بینی کل فرآیند، برای مشخص کردن دمای میدان دود آتش در فضاهای بزرگ بر اساس مدل توسعه آتش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تا زمانی که مدل انتخاب شده از ضریب شکل مناسب استفاده کند، مدل می‌تواند مقادیر دمای دود ناشی از آتش سوزی‌های موضعی را در ساختمان‌های با فضای بزرگ پیش‌بینی کند. جوتیک [۶]، شبیه‌سازی حریق در منزل مسکونی را مورد مطالعه قرار داد. شبیه‌سازی آتش راه بسیار قدرتمند، اقتصادی و ایمن برای تعیین خسارات احتمالی حریق می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده بهترین مکان برای قرارگیری آشکارساز حریق، دود، مونوکسید کربن و شعله برای حفاظت از جان انسان‌ها مشخص شد. زین و همکاران [۷]، اثر مهار حریق توسط سیستم اسپرینکلر در یک ساختمان تجاری را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، حالت‌های مختلف فعال‌سازی سیستم اسپرینکلر تحت سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در یک ساختمان بزرگ تجاری با استفاده از نرم‌افزار پائروسیم به صورت عددی بررسی شدند. از نتایج شبیه‌سازی مشخص گردید که سیستم اسپرینکلر می‌تواند در مراحل اولیه گسترش حریق را مهار کند، زیرا تجزیه مواد قابل احتراق که در اثر حرارت مهار می‌شود، روند انتقال حرارت را کاهش می‌دهد و در نتیجه مدت زمان تخلیه افراد در چنین ساختمان‌هایی افزایش می‌یابد.

خندوکر و همکاران [۸]، شبیه‌سازی عددی حریق در یک کارخانه تولید لباس با نرم‌افزار پائروسیم را انجام دادند. نتایج نشان دادند که پس از گذشت ۶ ثانیه از شروع حریق، دود در طبقه همکف و راه پله پخش شده و به طبقات بالاتر رسید و پس از گذشت ۱۷۰/۶ ثانیه برای افراد شرایط بحرانی ایجاد شد. وانگ و همکاران [۹]، مدل پائرولیزیز در نرم‌افزار پائروسیم برای شبیه‌سازی مجموعه‌ای از آزمایشات تونل با مقیاس کوچک با سرعت تهویه اجباری متغیر، در واحدهای ساخته شده از تخته ام دی اف به عنوان منبع سوخت به کار بردند. رفتار تجزیه در نرم‌افزار پائروسیم به طور موثر توصیف گردید و مقادیر بهینه شده توسعه داده شد. لی و همکاران [۱۰]، آنالیز عددی حریق به وجود آمده در اثر تغییرات فشار در ساختمان درزبند و تهویه مکانیکی را انجام دادند. فشار ناشی از آتش به قدری زیاد است که مانع عملیات تخلیه و نجات آتش‌نشانی به دلیل عدم امکان باز شدن درهای باز به داخل می‌شود.

جی و همکاران [۱۱]، توسعه عددی تاثیر باد خارجی بر خصوصیات دود در راه پله‌ها را بررسی کردند. به طور معمول، جریان باد خارجی از پنجره‌های شکسته وارد ساختمان می‌شود و بر جریان دود تاثیر می‌گذارد. این مقاله، خصوصیات دود در راه پله‌ها را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که سرعت صعود پلوم (توده دود) به یک ارتفاع مشخص با سرعت باد افزایش می‌یابد. غلظت مونوکسید کربن با توجه به سرعت باد تا ۱۵٪ افزایش می‌یابد که این موضوع خطر بزرگی برای قربانیان به دام افتاده است. بالیس‌مپانگ و همکاران [۱۲]، بهینه‌سازی سیستم گسترش دود در سناریوهای حریق با به کارگیری مدل دینامیک سیالات محاسباتی را انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد و نتایج بدست آمده نشان داد که نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارند. سپس یک مطالعه موردی برای دکتورها در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی باعث افزایش دید مسیر خروج در امتداد دالان یک ساختمان در هنگام انتشار سوخت و حادثه آتش‌سوزی می‌شود.

با توجه به پژوهش‌های پیشین، بررسی انتشار دود و پروفیل دما بر روی راه‌پله‌های خروجی افراد مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل در این پژوهش میزان دما و غلظت دود در راه‌پله‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

**معادلات حاکم**

پایروسیم نرم‌افزاری قوی برای شبیه‌سازی دینامیک آتش می‌باشد. نرم‌افزار از معادلات حاکم زیر استفاده می‌کند:

- بقای جرم

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

- بقای اندازه حرکت

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot \rho u \vec{u} = \rho \vec{g} - \nabla \vec{p} + \nabla \cdot \vec{\tau}_{ij} \quad (2)$$

- پایستاری جرم

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}_b''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon \quad (3)$$

- معادله حالت گاز کامل

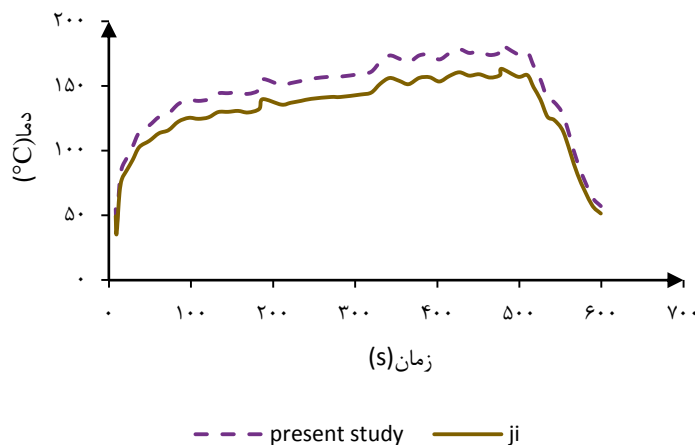
$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (4)$$

- آنتالپی: آنتالپی بر اساس دما طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT \quad (5)$$

**شبیه‌سازی****اعتبارسنجی**

برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج حل عددی بدست آمده از نرم‌افزار پایروسیم، با نتایج آزمایشگاهی جی [۱۳]، مقایسه گردید. در پژوهش جی، محفظه‌ای با ابعاد ۲ × ۱/۵ × ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. سوخت به کار گرفته شده در محفظه متان و حریق در سطح ۰/۲ × ۰/۲ اتفاق افتاد. حرارت آزاد شده ۲۳۵ کیلووات بر متر مربع بود. حریق مورد نظر در زمان ۶۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شد. پروفیل دما بدست آمد و با نتایج مقاله جی مقایسه گردید. پروفیل دما در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مقادیر دمای شبیه‌سازی شده با مقادیر دمای آزمایشگاهی مطابقت دارند. مقدار خطا ۱۰/۶ درصد نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد.



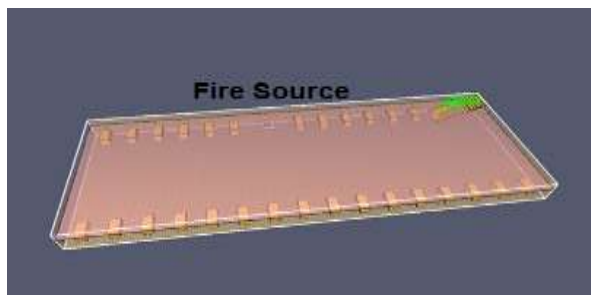
شکل (۱): مقایسه پروفیل دما برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و مقاله جی [۱۳]

**هندسه مورد بررسی**

پارکینگ مورد نظر در یک مجتمع تجاری قرار گرفته است. تهویه این پارکینگ به صورت سنتی از طریق کانال‌ها صورت می‌گیرد. انتشار دود و پروفیل دما در حریق پارکینگ مورد بررسی قرار گرفت. فضای پارکینگ دارای ابعاد ۳ × ۱۹ × ۴۸ متر می‌باشد. هندسه پارکینگ در نرم‌افزار پایروسیم رسم شد. هندسه مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است. در قسمت شرقی



پارکینگ راه‌پله خروجی وجود دارد. بررسی راه‌پله به دلیل خروج افراد در هنگام حریق بسیار اهمیت دارد. برای شبیه‌سازی حریق، محل حریق در قسمت شمالی پارکینگ قرار دارد. به دلیل اهمیت راه‌پله‌ها، دستگاه‌های اندازه‌گیری دما بر روی پله اول و سوم قرار گرفت. برای مشخص شدن غلظت دود در ارتفاع ۲ متری سیستم اندازه‌گیری غلظت دود برای نرم‌افزار تعریف شد.

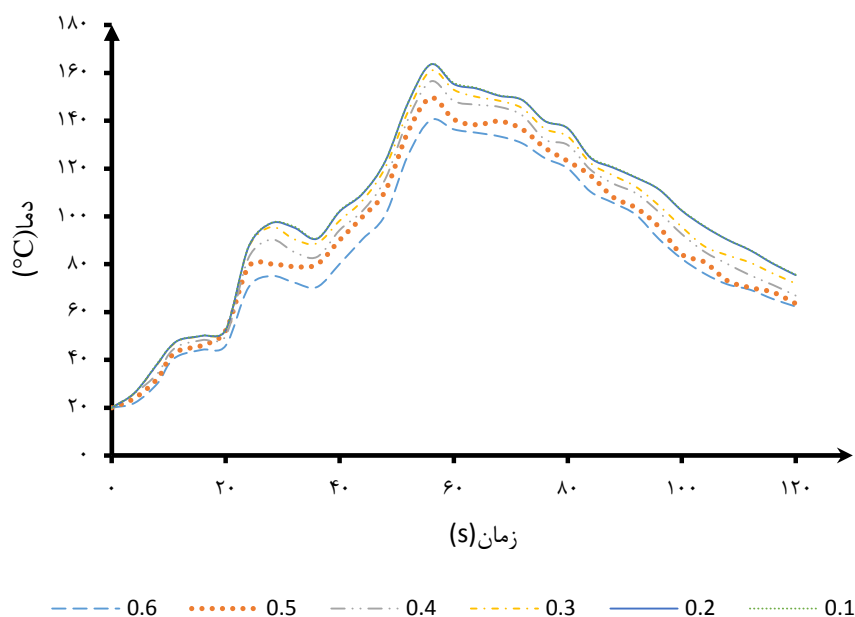


شکل (۲): هندسه پارکینگ در نرم‌افزار پابروسیم.

با توجه به استانداردهای آتش‌نشانی [۱۴]، برای شبیه‌سازی حریق در پارکینگ، میزان حرارت آزاد شده در حریق نمونه می‌بایست ۴ مگاوات باشد. بدین منظور با توجه به پژوهش‌های پیشین آتشی با ابعاد  $1/2 \times 1/2$  متر و قدرت ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع با سوخت روغن در قسمت شمالی پارکینگ در نظر گرفته شد.

#### استقلال حل از شبکه

برای کاهش خطای سائز شبکه در شبیه‌سازی‌های عددی، می‌بایست مناسب‌ترین اندازه شبکه به کار گرفته شود تا بتوان تاثیر شبکه بر حل را حذف نمود. در اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی نتایج حل با یکدیگر مقایسه گردید. در این پژوهش، هندسه مورد نظر با سائز ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ متر شبکه‌بندی شد و نتایج حل دما در ۱۲۰ ثانیه با یکدیگر مقایسه گردید. شکل (۳)، نتایج دما در این شبکه‌بندی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص می‌باشد، در سائز ۰/۲ و ۰/۱ متر تقریباً نمودارها بر روی هم منطبق شده‌اند. به همین دلیل حل برای شبکه‌بندی با سائز ۰/۲ متر انجام شد.



شکل (۳): نمودار دما در سائزهای مختلف شبکه‌بندی.



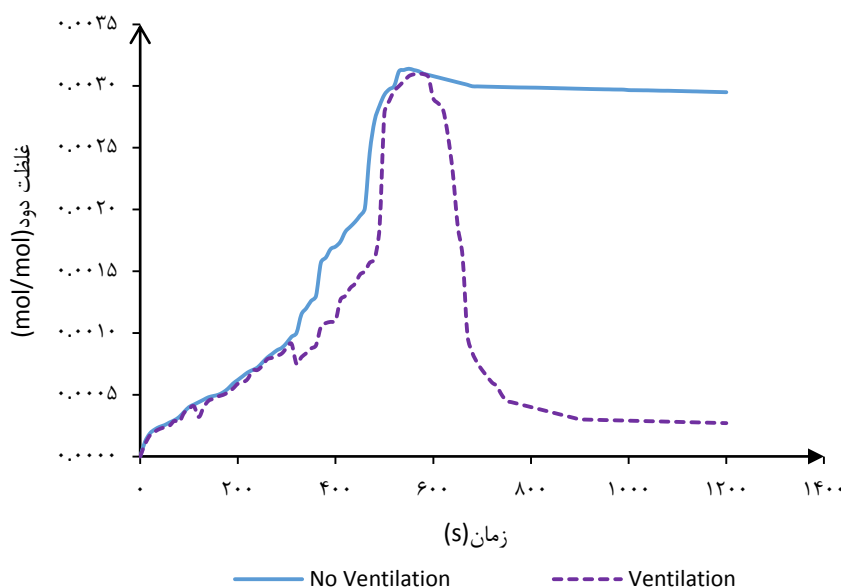
در ناحیه‌ای که حریق اتفاق می‌افتد دقت نتایج بسیار اهمیت دارد. از این رو شبکه محاسباتی غیر یکنواخت انتخاب شد و در نزدیکی منبع حریق سایز شبکه ۰/۱ متر در نظر گرفته شد.

## نتایج و بحث‌ها

در این پژوهش برای بررسی حریق، دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول پارکینگ بدون سیستم تهویه در نظر گرفته شد و پروفیل دما، پروفیل دود و غلظت دود برای ۱۲۰۰ ثانیه بدست آمد. در سناریوی دوم پارکینگ همراه با سیستم تهویه سنتی بررسی شد. در این حالت فن تزریق هوا (سپلائی فن) برای رقیق کردن دود و فن تخلیه دود (اگزاست فن) برای تخلیه دود استفاده می‌گردد.

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی حریق، تعویض هوا ۱۰ مرتبه در نظر گرفته شد. تمام فن‌ها می‌بایست از نوعی انتخاب گردند که به مدت یک ساعت در برابر دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت داشته باشند. ظرفیت فن تزریق هوا می‌بایست ۵۰٪-۷۵٪ هوای تخلیه باشد، به طوری که فشار پارکینگ منفی بماند. فشار منفی پارکینگ مانع از نفوذ هوای پارکینگ به سایر نقاط ساختمان می‌شود. در این پژوهش، ظرفیت فن تخلیه دود ۵۰٪ هوای تخلیه در نظر گرفته شد.

دود ایجاد شده فضای ساختمان را در بر می‌گیرد. در موارد آتش‌سوزی بیشتر مرگ‌ها ناشی از مسمومیت تنفسی می‌باشد. پس بررسی پروفیل دود و دما و میزان غلظت مونوکسید کربن پس از شروع حریق بسیار اهمیت دارد. در شکل (۴) میزان غلظت مونوکسید کربن در دو سناریوی مورد نظر با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که تهویه وجود ندارد، مقدار غلظت مونوکسید کربن بالا رفته و در مقدار خاصی ثابت می‌ماند. در حالت دوم که تهویه صورت می‌گیرد و فن تخلیه دود پس از ۳۰ ثانیه شروع به کار می‌کند، میزان دود تا حدود ۰/۰۰۳ مول بر مول افزایش می‌یابد و سپس با تخلیه دود و ورود هوای تازه توسط سپلائی فن میزان دود تا حدود ۰/۰۰۲ مول بر مول کاهش می‌یابد. با تهویه فضای مورد نظر میزان غلظت دود کاهش یافته و افراد مدت زمان بیشتری برای فرار از این مکان دارند.

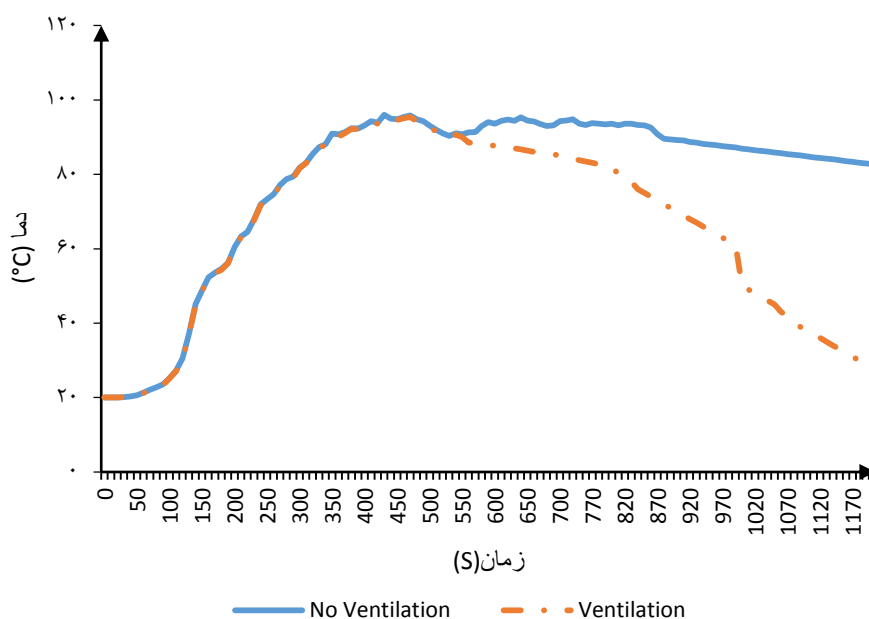


شکل (۴): نمودار غلظت دود در دو سناریو مورد نظر.

پس از بررسی میزان دود در فضای پارکینگ، دمای پارکینگ اهمیت زیادی دارد. اگر دما بالا برود افرادی که در حریق گیر افتاده‌اند به سختی می‌توانند دمای بالا را تحمل کنند. در شکل ۵، دما در دو سناریوی مختلف با هم مقایسه شده است. در سناریوی اول که تهویه وجود ندارد در ابتدا دما ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با شروع حریق و پخش دود این مقدار در زمان



۶۰۰ ثانیه تا نزدیک ۹۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و سپس با پایان یافتن سوخت تا میزان ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. شخصی که در فضای پارکینگ بدون تهویه قرار می‌گیرد در هنگام حریق با توجه به دمای بالا نمی‌تواند به راحتی فرار کند. در سناریوی دوم که سیستم تهویه و اگزاست فن وجود دارد در ۶۰۰ ثانیه مقدار دما تا ۸۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد اما با فعال شدن اگزاست فن‌ها و ساپلای فن پس از گذشت ۹۰۰ ثانیه مقدار دما تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد کم شده و در زمان ۱۲۰۰ ثانیه به ۲۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که در مقایسه با سناریوی اول به میزان ۶۵٪ بهبود یافته است. این نکته می‌بایست در نظر گرفته شود که سیستم اندازه‌گیری دما و غلظت دود در راه‌پله قرار دارد و هنگامی که در این منطقه دما ۲۸ درجه سانتی‌گراد باشد در بقیه پارکینگ نیز شرایط همانند راه‌پله‌ها می‌باشد.



شکل (۵): نمودار دما در دو سناریو مورد نظر.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش پخش دود و پروفیل دما در یک پارکینگ مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول پارکینگ بدون سیستم تهویه می‌باشد. در سناریوی دوم، پارکینگ همراه با سیستم تهویه در نظر گرفته شد. در این سیستم تهویه اگزاست فن برای تخلیه دود و ساپلای فن برای جبران هوا مورد استفاده قرار گرفت. برای تخلیه دود ۱۵ دریچه با ظرفیت ۱۸۲۴ متر مکعب بر ساعت و تامین هوا ۱۵ دریچه با ظرفیت ۹۱۲ متر مکعب بر ساعت در نظر گرفته شد. در فضای مورد نظر حریقی با قدرت ۴ مگاوات شبیه‌سازی گردید و در مدت ۱۲۰۰ ثانیه غلظت دود و دما در دو سناریو با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید در سناریوی اول پس از وقوع حریق میزان غلظت دود به ۰/۰۰۳ مول بر مول افزایش می‌یابد و افزایش غلظت دود خطر جدی برای افراد واقع در پارکینگ می‌باشد. در سناریوی دوم با فعال شدن اگزاست فن، میزان غلظت دود به ۰/۰۰۲ مول بر مول کاهش یافت و به میزان ۹۳٪ بهبود یافت. در سناریوی اول بدون سیستم تهویه، دما در ابتدا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. پس از شروع حریق دما به ۹۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و پس از تمام شدن سوخت در پایان بررسی حریق تا مقدار ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید. در سناریوی دوم به دلیل حضور اگزاست فن دود از پارکینگ خارج می‌گردد. در ابتدا دما به میزان ۸۷ افزایش یافت اما پس از ۹۰۰ ثانیه به میزان ۷۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت و در ۱۲۰۰ ثانیه به مقدار ۲۸ درجه سانتی‌گراد رسید که نسبت به سناریوی اول ۶۵٪ بهبود یافت.



## مراجع

- [1] گل محمدی، ر.، (۱۳۸۸)، مهندسی حریق، فن‌آوران، همدان، ۴۰۸
- [2] Chow, W.K. and Chow, C.L., (2011), *Simulating Smoke Filling in Big Halls by Computational Fluid Dynamics, Modelling and Simulation in Engineering*, 2011, pp 1-16.
- [3] Valasek, L. (2013), The Use of PyroSim Graphical User Interface For FDS Simulation of a Cinema Fire, *International Journal Of Mathematics And Computers In Simulations*, 3 (7), pp 258-266.
- [4] Pietreanu C, Panaitescu V. (2013), Cheking Jet-Fan's Fire Performance From Closed Car Parks Using Pyrosim Program. *Materials and Mechanics*; 8 (11), pp 153-156.
- [5] Zhang, G.w., Zhu, G.q., Yin, F.A., (2014), Whole Process Prediction Method for Temperature Field of Fire Smoke in Large Spaces. *Procedia Engineering*, 71, pp 310-315.
- [6] Jevtik, R., (2015), Fire Simulation in House Conditions, , *Standardizacija I Metrologija*, 16, pp 160-166.
- [7] Xin, Ye., Jian, Ma., Lin, Shen, Y.x., Lin, L.y., (2016), Suppression effect of sprinkler system on fire spread in large commercial buildings, *Procedia Engineering*, 135, pp 455-462.
- [8] Khandoker, M.A.R., Mou, R.J, Muntaha, M.A., Rahman, M.A., (2018), Numerical simulation of fire in a multistoried ready-made garments factory using PyroSim, *AIP Conference Proceedings: AIP Publishing LLC*, 11, pp 1-7.
- [9] Wang, X., Fleischmann, C., Spearpoint, M., (2020), Applying the FDS pyrolysis model to predict heat release rate in small-scale forced ventilation tunnel experiments. *Fire Safety Journal.*; 102946, pp 30491-30500
- [10] Li, J., Beji, T., Brohez, S., Merci, B., (2020), CFD study of fire-induced pressure variation in a mechanically-ventilated air-tight compartment, *Fire Safety Journal*, 115, pp 1-11.
- [11] Ji, J., Zhu, L., Ding, L., Yu, L., Wan, H., (2020), Numerical investigation of external wind effect on smoke characteristics in a stairwell, *Fire technology*, 56(4):1681-702.
- [12] Baalisampang, T., Saliba, E., Salehi, F., Garaniya, V., Chen, L., (2021), Optimisation of smoke extraction system in fire scenarios using CFD modelling. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, pp 508-517.
- [13] Ji, J., Fu, Y.Y., Fan, C.G., Gao, Z.H., Li, K.Y., (2015), An Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Sidewall Fire in Corridor-like Structures With Varying Width, *Heat Mass Transfer*, 84, pp 562-570;
- [14] Hodges, J.L., Lattimer, B.Y., Luxbacher, K.D., (2019), Compartment fire predictions using transpose convolutional neural networks. *Fire Safety Journal*, 108: pp 102854.
- [15] Hu, G., (2020), Research on the Fire of High-rise Residential Building Based on Pyrosim Numerical Simulation. *IOP Conference Series, Earth and Environmental Science*, IOP Publishing
- [16] Sun Q, Turkan Y. A BIM-based simulation framework for fire safety management and investigation of the critical factors affecting human evacuation performance. *Advanced Engineering Informatics*. 2020;44:101093
- [17] Li, Z., Huang, H., Li, N., Zan, M.L.C, Law, K., (2020), An agent-based simulator for indoor crowd evacuation considering fire impacts. *Automation in Construction*, 120:103395
- [18] Truchot, B., Fouillen, F., Collet, S., (2018), An Experimental Evaluation of Toxic Gas Emissions from Vehicle Fires, *Fire Safety Journal*, 97, pp 111-118
- [19] Viegas, J. C., (2020), The Use of Impulse Ventilation for Smoke Control in Underground Car Parks, *Tunneling and Underground Space Technology*, 25 (1), pp 42-53.
- [20] Zhang, X.G., Guo, Y.C., Chan, C.K., Lin, W.Y., (2020), Numerical Simulations on Fire Spread and Smoke Movement in an Underground Car Park, *Building and Environment*, 42, pp 3466-3475