

بررسی عددی تاثیر باد جانبی در راه پله ساختمان بلند با نرم افزار پایروسیم

چکیده

ساختمان‌های با ارتفاع زیاد معمولاً در معرض وزش باد هستند. به جز اثر دودکشی، حرکت دود و رفتار حریق به شدت تحت تاثیر نیروهای باد خارجی می‌باشد. در این پژوهش تاثیر باد جانبی به صورت عددی با نرم‌افزار پایروسیم و به کارگیری معادلات ناویراستوکس، انرژی، بقا جرم، حریق و توزیع دود بررسی شد و برای آشفتگی از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج با پژوهش ژاو و همکاران مقایسه گردید. سرعت باد جانبی بین 0 تا 1/2 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. تاثیر باد جانبی بر دمای دود در گرمای آزاد شده مختلف ارزیابی شد. گرمای آزاد شده در سه حالت 300، 500 و 900 کیلووات در نظر گرفته شد. در گرمای آزاد شده ثابت، دما در ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک پیک دمایی برسد سپس با افزایش سرعت باد میزان دما کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش سرعت باد میزان غلظت کربن مونوکسید حدود 3% بیشتر شد. نتایج نشان داد که باد جانبی، خطر حریق را افزایش می‌دهد و می‌بایست در طراحی ساختمان‌های در معرض باد مورد توجه قرار گیرد.

*عهده‌دار مکاتبات behbahani.fatemeh652@gmail.com

کلمات کلیدی: حرکت دود، رفتار حریق، باد جانبی، نرم‌افزار پایروسیم، دمای دود.

Numerical Verification of the Effect of Side Wind on the Staircase of a Tall Building With Pyrosim Software

Abstract

High-rise buildings are usually exposed to wind. Except for the chimney effect, smoke movement and fire behavior are strongly influenced by external wind forces. In this research, the effect of side wind was investigated numerically with Pyrosim software and using the Navirastox equations, energy, mass survival, fire and smoke distribution, and the large eddy simulation model was used for turbulence. For validation, the results were compared with Zhao et al.'s research. The side wind speed was considered between 0 and 1.2 m/s. The effect of side wind on smoke temperature was evaluated at different released heat. The released heat was considered in three modes of 300, 500 and 900 kW. In the case of constant released heat, the temperature should increase at first until it reaches a temperature peak, then the temperature decreases with the increase in wind speed. Also, with the increase in wind speed, the concentration of carbon monoxide increased by about 3%. The results showed that the side wind increases the risk of fire and should be considered in the design of buildings exposed to the wind.

Keywords: Smoke Movement, Fire Behavior, Side Wind, Pyrosim Software, Smoke Temperature.

افزایش جمعیت و شیوه زندگی امروزی، شهر را به توسعه عمودی و شهروندان را به زندگی در ساختمان‌های بلند سوق داده است [۱]. از طرفی وقوع حوادث و سوانح طبیعی و انسان ساخت جز اجتناب‌ناپذیر زندگی بشری هستند. یکی از عوامل تهدید کننده ساختمان‌ها بحث حریق و آتش‌سوزی در آن‌ها است. میزان حساسیت به حریق در طراحی سازه‌ها در ساختمان‌های متفاوت بسته به کاربری و تصرف آن‌ها متفاوت است. هر چه سازه از نظر اجتماعی، سیاسی و یا اقتصادی مهم‌تر باشد توجه به بحث ایمنی نیز در آن اهمیت بیشتری دارد. در طراحی و ساخت چنین سازه‌هایی باید اصول ایمنی کاملاً رعایت شوند. برای این کار طراح باید با رفتار ساختمان‌ها و مصالح ساختمانی در برابر آتش آشنایی کافی داشته باشد. آتش‌سوزی علاوه بر خسارات مالی بسیار می‌تواند باعث آسیب به سلامت افراد و رخ دادن آسیب‌های روحی نیز شود که این خسارات می‌توانند در مواردی کاملاً جبران‌ناپذیر باشند. در نتیجه، جلوگیری از وقوع چنین حوادثی و علاج واقعه قبل از وقوع بسیار مهم بوده و می‌تواند این آسیب‌ها را تا حد قابل قبولی کاهش دهد. حریق در ساختمان‌های تجاری با ارتفاع زیاد چالش‌ها و شرایطی را به وجود می‌آورد، زیرا این ساختمان‌ها از نظر طراحی و ظرفیت منحصر به فرد هستند [۲]. آتش‌سوزی در این ساختمان‌ها علاوه بر خسارت‌های جانی، هزینه‌های تعمیرات و خسارت‌های مالی عمده‌ای بر جای می‌گذارد. تخلیه در این ساختمان‌ها می‌تواند منابع عظیمی را به هم گره بزند، مناطق وسیعی از شهر را تعطیل می‌کند و اگر مدیریت تخلیه به صورت موثر اتفاق نیفتد، می‌تواند زندگی افراد زیادی را به خطر بیندازد [۳]. کنترل دود و جریان هوا یکی از چالش‌های بزرگ این ساختمان‌ها می‌باشد. به طور کلی گازهای سمی عامل اصلی مرگ و میر در حریق ساختمان‌ها است [۴]. بنابراین کنترل دود بسیار اهمیت دارد. در حریق ساختمان‌های بزرگ و بلند، راهروهای افقی و شافت‌ها و راه‌پله‌های عمودی عامل اصلی گسترش دود هستند. اگر اثر دودکشی اتفاق بیفتد، شافت‌ها و راه‌پله‌های عمودی بسیار سریع دود را گسترش می‌دهند. گسترش دود به طور اساسی از طریق اثر دودکشی، جریان‌های آشفته و نیروهای باد خارجی ایجاد می‌شود [۵]. تحقیقات قابل توجهی به منظور بررسی اثر دودکشی و ویژگی‌های صعود دود بدون در نظر گرفتن اثر باد خارجی برای چندین دهه انجام شد [۶]. کی^۱ و همکاران مکان سطح صفحه خنثی در یک شافت بلند را بررسی کردند. این مکان جایی است که فشار داخلی شافت برابر با فشار کف ساختمان در همان ارتفاع می‌باشد. آنها بیان کردند که پخش دمای غیریکنواخت توده دود در یک شافت یک فاکتور اساسی در مشخص کردن سطح صفحه خنثی می‌باشد [۷]. جی^۲ و همکاران خصوصیات بالارونده توده دود و پخش دما در یک راه‌پله با مقیاس کوچک را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که زمان رسیدن پلوم دود به ارتفاع معین با گرمای آزاد شده نسبت معکوس دارد [۸]. لی^۳ و همکاران یک مدل برای پیش‌بینی فرآیند اختلاط آشفته‌ی ایجاد شده از انتقال حرارت توده دود به مرزها را ارائه دادند. مطالعات قبلی در شافت‌های بسته، انتقال حرارت از پلوم دود شناور داغ به مرزها مانند دیوارها را در نظر نگرفته بود. مقایسه مدل پیش‌بینی شده و نتایج تجربی نشان داد که مدل اختلاط آشفته قبلی بدون اثر

¹ Qi

² Ji

³ Li

مرزی دماهای بالاتری در راه‌پله در مقایسه با داده‌های تجربی پیش‌بینی کردند [۹]. لین^۴ و همکاران تاثیر تهویه را بر اثر دودکشی ناشی از آتش ارزیابی کردند و یک روش نظری برای توصیف اثر دودکشی در ساختمان‌های بلند ارائه دادند. با توجه به نتایج مشخص شد که تهویه تأثیر پیچیده‌تری بر حریق نسبت به اثر دودکشی ناشی از آب و هوا دارد هم‌چنین روش در نظر گرفته شده به خوبی توزیع فشار در ساختمان‌های بلند را پیش‌بینی می‌کنند [۱۰].

آتش‌سوزی ساختمان‌های بلند اغلب تحت تأثیر بادهای محیطی قرار می‌گیرد [۱۱]. به خصوص برای ساختمان‌های بلند، باد محیط با افزایش ارتفاع قوی‌تر می‌شود [۱۲]. هنگامی که ساختمان‌ها در معرض باد قرار می‌گیرند، فشار باد مثبت بر ساختمان رو به جریان باد اثر می‌گذارد، در حالی که فشار باد منفی در طرف‌های دیگر ساختمان جریان دارد [۱۳]. در بیشتر حوادث آتش‌سوزی، باد خارجی به تسریع انتشار آتش و پخش دود می‌شود و زمان کمتری را برای فرار ساکنان ساختمان باقی می‌گذارد [۱۴]. مطالعه رفتار حریق در ساختمان‌های بلند رو به باد برای بررسی حرکت و کنترل دود حریق مورد نیاز است. چن^۵ و همکاران، جهت جریان دود و دمای آتش کنترل‌شده با تهویه در یک محفظه دو دریچه در هنگام وزش باد محیطی به سمت دریچه در ارتفاع بالاتر مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که یک سرعت باد بحرانی وجود دارد، که در بالای آن جهت حرکت دود به جای اثر شناوری تحت سلطه باد است. هم‌چنین مشخص شد که باد محیط تأثیر پیچیده‌ای بر دمای دود در محفظه دارد. هنگامی که سرعت باد از یک مقدار بحرانی دیگر تجاوز می‌کند، تنها یک حالت ثابت در منحنی افزایش دمای دود ظاهر می‌شود. در غیر این صورت سه حالت ثابت ظاهر می‌گردد. انتقال حرارت از طریق دیوارهای محفظه تأثیر زیادی بر سرعت بحرانی باد دارد. آنها تاثیر باد عرضی بر یک محفظه حریق با دو بازشو را بررسی کردند و روابطی برای پیش‌بینی حرکت دود ارائه دادند [۱۵]. لی و همکاران احتمال پرتاب شعله در یک محفظه تحت باد محیط را بررسی کردند. در ساختمان‌های بلند چند طبقه، راه‌پله یا شافت با پنجره مسیر مهمی برای پراکندگی دود است که می‌تواند به راحتی تحت تأثیر باد خارجی قرار گیرد. نتایج نشان داد که وقتی باد خارجی وجود ندارد یا سرعت آن کم باشد، جریان دو طرفه در درب دیده می‌شود. با افزایش سرعت باد، جریان یک طرفه می‌شود. در سرعت بالای باد، جریان یک جهته را می‌توان بدون توجه به نرخ تامین سوخت در درب مشاهده کرد [۱۶]. جی و همکاران مطالعه آزمایشگاهی، اثر باد خارجی بر رفتارهای شعله و نرخ سوختن در یک شافت مدل مقیاس شده وقتی که نیروی باد و شناوری حرارتی مخالف هم باشند را انجام دادند. در چنین شرایطی اثر باد و اثر دودکشی با یکدیگر رقابت خواهند کرد که نتیجه این رقابت تغییر در حرکت دود می‌باشد. آنها گزارش دادند که وقتی باد خارجی به اندازه کافی، قوی است اثر دودکشی ممکن است رخ ندهد زیرا گازهای داغ نمی‌توانند وارد شافت شوند و دمای شافت نزدیک به دمای هوای محیط است [۱۷]. باد خارجی در عرض پنجره بیشتر در آثار قبلی بررسی شده است. در حقیقت باد موازی با پنجره‌ها بیشتر اتفاق می‌افتد که در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار نگرفت. سوگوا^۶ و همکاران اثر باد خارجی جانبی بر شکل‌های شعله یک محفظه حریق باز را مورد بررسی قرار دادند [۱۸].

ژاو و همکاران تاثیر باد جانبی بر روی حریق در ساختمان‌های بلند را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. با توجه به نتایج بدست آمده دود با اثر سینرژیک باد جانبی و اثر دودکشی سریع‌تر پخش می‌شود. میزان نرخ تلفات جرم سوخت و سرعت باد بر دما تاثیرگذار است [۱۹]. با این حال، برای یک ساختار پیچیده‌تر مانند یک ساختمان بلند، باد جانبی نه تنها بر روی شکل شعله تأثیر می‌گذارد بلکه مهمتر از آن الگوهای جریان هوا و رفتارهای دود در آتش‌سوزی رخ می‌دهد که می‌بایست مورد ارزیابی قرار گیرند [۲۰]. وقتی باد موازی پنجره یک شافت عمودی یا راه‌پله است، کاهش فشار ظاهر می‌شود و هوای تازه بیرون از دهانه پایین بدون اثر دودکشی به داخل ساختمان مکیده می‌شود. در نتیجه، دود با اثر دودکشی و فشار باد به سرعت

⁴ Lin

⁵ Chen

⁶ Sugawa

بالا می‌رود. رابطه بین اثر باد و شناوری حرارتی در پژوهش‌های پیشین بدست آورده شده است. بنابراین، بررسی مکانیسم حرکت دود و رفتارهای آتش در طول یک آتش‌سوزی ساختمان مرتفع تحت تأثیر باد خارجی جانبی ارزشمند است.

در پژوهشی اثر استفاده از جت فن‌ها و همچنین استفاده از فن‌های برگشت‌پذیر در پارکینگ را بررسی کردند و ثابت کردند که استفاده از این فن‌ها، اثر مطلوبی بر به وجود آمدن گردش هوا در پارکینگ دارد [۲۱]. آنها اثر برهم کنش جریان هوای ورودی از قسمت ورودی پارکینگ بر میزان هدایت منوکسیدکربن به سمت فن خروجی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این حالت جت فن‌ها توانایی هدایت آلاینده‌ها به سمت خروجی را داشتند. فرناندز و هنریکس در این پژوهش بیان کردند که با استفاده از حل عددی می‌توان به بهترین ترکیب ممکن جهت هدایت مؤثر آلاینده‌ها به همراه در نظر گرفتن جریان هوای ورودی دست یافت.

لئو^۷ و همکاران در پژوهشی سیستم کنترل دود در یک پارکینگ زیرزمینی را بررسی کردند [۲۲]. آنها با کمک نرم-افزار پروسیم به تجزیه و تحلیلی در ارتباط با پارامترهای مهم از قبیل تعداد جت فن‌ها، ظرفیت جت فن‌ها، میزان استخراج دود در موقع آتش‌سوزی و مقایسه جت فن با سیستم تهویه سنتی (داکتی) پرداخته‌اند. آنان به نتیجه رسیدند که سرعت بالای جت فن باعث ایجاد دود بیشتری می‌شود. پس مهم است جت فنی با سرعت مناسب انتخاب شود، همچنین جت فن باعث پخش دود می‌شود اما غلظت دود کمتر است و افراد داخل پارکینگ دید قابل قبولی دارند.

تونی^۸ با استفاده از نرم‌افزار پروسیم اثر جت فن بر فعال‌سازی اسپرینکلر را بررسی کرده است [۲۳]. با فعال شدن جت فن، دما پایین می‌آید و باعث می‌شود اسپرینکلرها دیرتر فعال شوند. دکرز و همکارانش، با شبیه‌سازی کنترل دود در یک پارکینگ اثر سرعت تهویه را بررسی کردند، نتایج بیانگر این نکته بود که افزایش سرعت تهویه از یک مقدار مشخص، کمکی به تخلیه دود نمی‌کند؛ بلکه آتش را گسترش داده و میزان تولید دود را بیشتر می‌کند.

ژانگ و همکارانش، جریان القایی آتش داخل فضای یک اتاق بسته را به روش گردابه‌های بزرگ با مدل زیرشبکه اسماگورینسکی مدل کردند و مشخصه‌های اغتشاشی جریان را محاسبه کردند [۲۴]. مقایسه نتایج حاصل با نتایج تجربی نشان داد که ضعف این مدل در پیش‌بینی دما و مشخصه‌های اغتشاشی است و این خطا در نزدیکی سقف و با نزدیک شدن به مرز جامد افزایش می‌یابد.

با پیشرفت روزافزون صنایع و رقابت بسیار بالا، نقش دو عامل زمان و هزینه بیش‌ازپیش مهم شده است. کاهش زمان در فرآیندهای شبیه‌سازی مهندسی و توانایی پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها با استفاده از مدل‌سازی‌های کامپیوتری، به مهندسان طراح کمک می‌کند که خروجی کار آنها با کمترین خطا و ریسک قابل اجرا باشد.

در این پژوهش یک راه‌پله در یک ساختمان ۶ طبقه در معرض باد خارجی جانبی در نرم‌افزار پروسیم مورد بررسی قرار گرفته است و با پژوهش ژاو و همکاران مقایسه شده است. در اینجا سرعت باد و حرارت آزاد شده مقادیر مختلفی در نظر گرفته شدند و پخش دود و دما در اثر باد خارجی جانبی بدست آمدند.

۲- معادلات حاکم

⁷ Lu

⁸ Tony

پایروسیم یک رابط گرافیکی برای شبیه‌سازی دینامیک آتش می‌باشد. شبیه‌ساز دینامیک آتش، حالات مختلف آتش‌سوزی را با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی برای جریان سیالات حامل آتش است. این مدل شکلی از معادلات ناویراستوکس برای سیالات با سرعت کم با تأکید بر دود و انتقال حرارت از آتش است را به صورت عددی حل می‌کند. با دقت بالایی حرکت و رفتار دود، دما و گازهای سمی منتشرشده را شبیه‌سازی کرده و مورد تحلیل قرار می‌دهد.

با این نرم‌افزار به راحتی می‌توان با تنظیم پارامترهای مختلف یک آتش ساختگی را در یک محیط مشخص راه بیندازید و سپس مشاهده می‌شود که این آتش به چه صورتی گسترش پیدا می‌کند، دود حاصل از آنچه نوع حرکاتی دارد و چه گازهای سمی با چه غلظت و دمایی منتشر می‌شود. این اطلاعات برای طراحی ایمن‌تر ساختمان و محل‌های مسکونی بسیار ارزشمند خواهد بود.

این نرم‌افزار شامل حل عددی از معادلات ناویراستوکس در جریان هدایت حرارتی و کم سرعت با تمرکز بر روی ویژگی‌های انتقال دود و حرارت ناشی از حریق را شبیه‌سازی می‌کند. مدل‌های شبیه‌ساز دینامیک آتش می‌توانند دود، حرارت، مونوکسیدکربن و مواد دیگر را در طول آتش‌سوزی پیش‌بینی کنند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها، برای اطمینان‌بخشی به ایمنی ساختمان قبل از ساخت‌وساز، ارزیابی گزینه‌ها یا ایمنی ساختمانهای موجود، بازسازی آتش‌سوزی برای تحقیقات پس از حادثه و کمک به آموزش آتش‌نشان‌ها استفاده شده است. نرم‌افزار از معادلات حاکم زیر استفاده می‌کند [۲۵]:

- 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

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

- معادله حالت گاز کامل

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

- آنتالپی: آنتالپی بر اساس دما طبق رابطه زیر بدست می‌آید [۲۶]:

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

$$\Delta P = \frac{\rho_0 U^2}{2} \quad (6)$$

(۶)

$$U = k Q^{1/3} + b \quad (7)$$

(۷)

$$k = 0/47 - 0/12v \quad (8)$$

(۸)

$$b = 0/57v - 0/15 \quad (9)$$

(۹)

شبیه‌سازی حریق در نرم‌افزار از طریق روش گردابه‌های بزرگ برای جریان آشفته محاسبه می‌شود. برای بدست آوردن نتایج مناسب حریق می‌بایست شبکه‌ی محاسباتی ابعاد قابل قبولی داشته باشد. برای استقلال حل از شبکه، می‌بایست طول مشخصه بدست آید. رابطه‌ی زیر برای طول مشخصه به کار می‌رود [۲۷]:

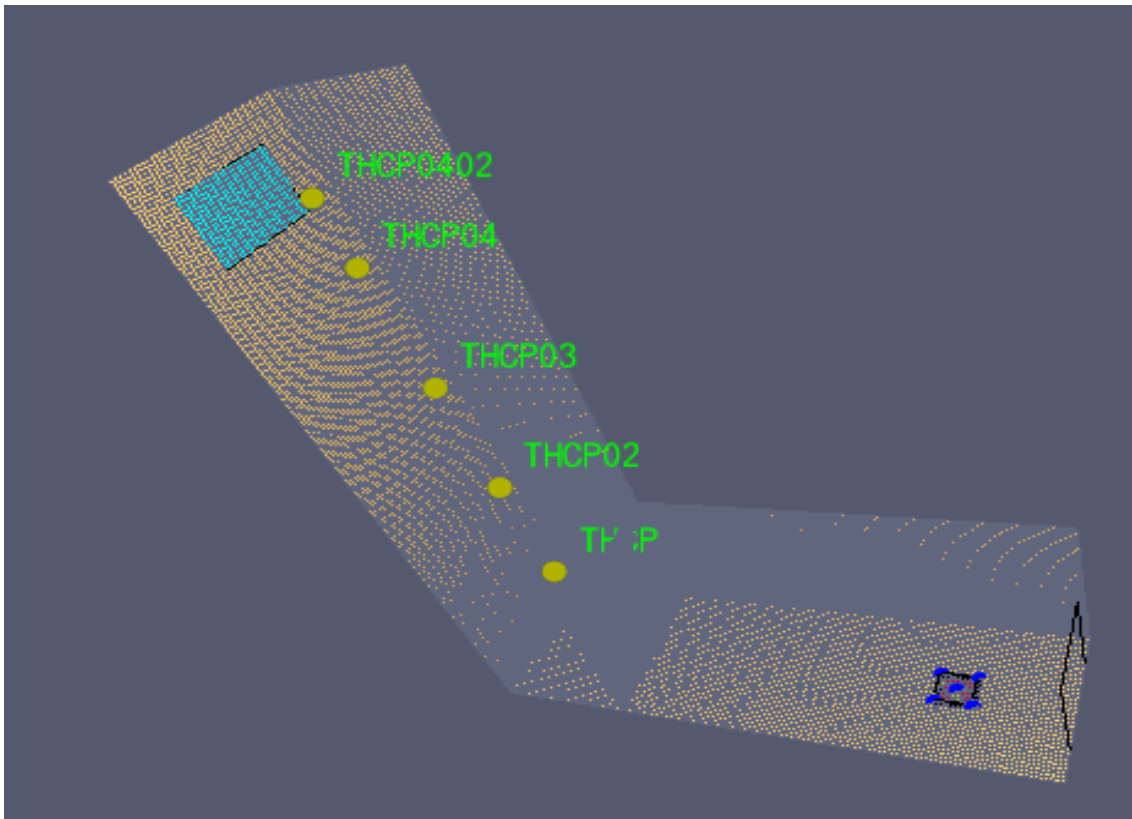
$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{0/4} \quad (10)$$

با مدل کردن حریق، می‌توان دما، فشار، سرعت و ترکیبات شیمیایی در هر سلول را برای گام‌های زمانی کوچک محاسبه کرد. معمولاً در هر تکرار میلیون‌ها سلول وجود دارد. در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار پایروسیم، معادلات ناویراستوکس، انرژی، بقاء جرم، حریق و توزیع دود حل و برای آشفتگی از مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. ادی‌های بزرگ به‌طور مستقیم و با استفاده از شبکه حل و گردابه‌های کوچک از مدل زیرشبکه اسماکورینسکی به دست آورده شد.

۳- شبیه‌سازی

۳-۱- هندسه مورد بررسی

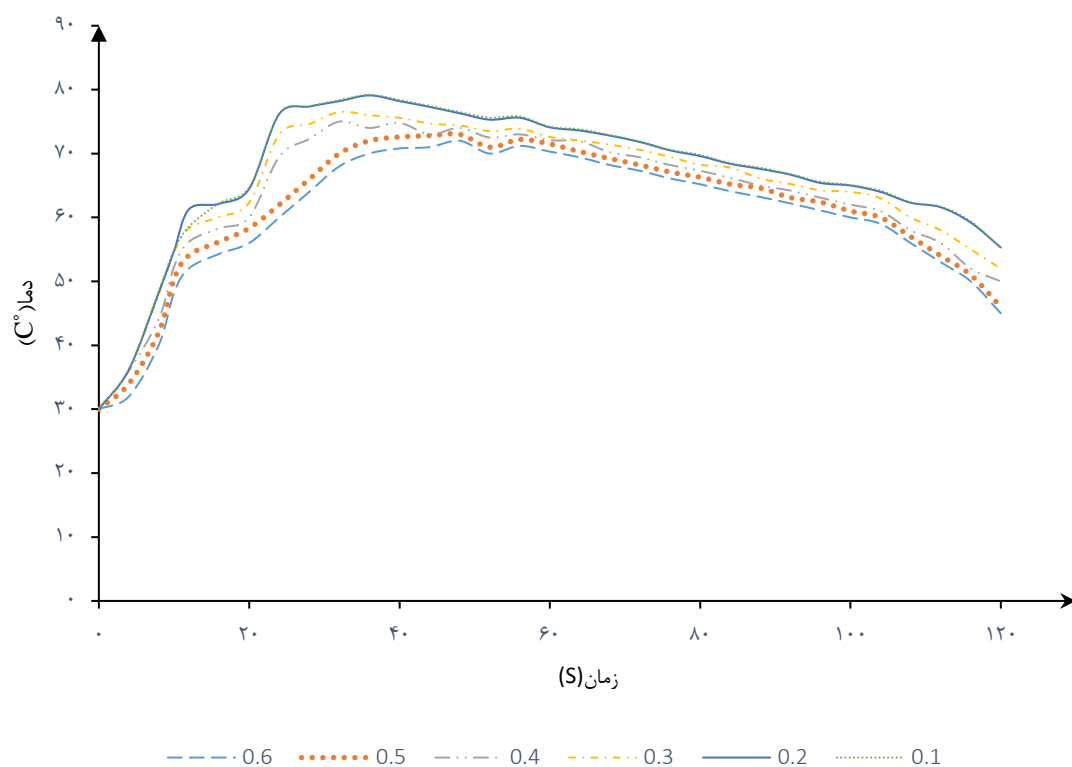
هندسه مورد بررسی در پژوهش زاو و همکاران یک شافت عمودی یا راه‌پله با شش طبقه و یک راهرو بلند می‌باشد. در این پژوهش شافت و راهرو مورد نظر در نرم‌افزار پایروسیم شبیه‌سازی شده است. ارتفاع شافت ۳۰ متر، طول آن ۴ متر و عرض ۳ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۵ متر است. راهرو به طول ۱۲ متر، عرض ۴ متر و ارتفاع ۵ متر می‌باشد. درب ورودی راهرو دارای ابعاد ۳×۴ متر است. پنجره با ابعاد ۳×۲ متر در طبقه‌ی بالا قرار دارد. باد به صورت جانبی به پنجره طبقه بالا می‌وزد. برای اندازه‌گیری دما ۵ ترموکوپل در شافت یا راه‌پله قرار داده شده است. مقدار حرارت آزاد شده ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ کیلووات و مقدار سرعت باد جانبی ۰ تا ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. دمای محیط ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. هندسه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: هندسه راه پله یا شافت در نرم افزار پروسیم

۲-۳- استقلال حل از شبکه

استقلال از شبکه، انتخاب بهینه ترین شبکه ممکن برای دریافت پاسخ های صحیح می باشد. به عبارت دیگر اگر شبکه بندی بسیار درشت باشد، مسلماً جواب های شبیه سازی قابل اعتماد نخواهد بود و اگر مش بندی بسیار ریز باشد باز هم به علت خطای گرد کردن و هزینه محاسباتی بالا احتمالاً جواب های صحیحی بدست نمی آید. به منظور کاهش خطای اندازه شبکه در شبیه سازی های عددی، باید مناسب ترین سایز شبکه انتخاب شود تا بتوان تاثیر اندازه شبکه بر روی حل را حذف نمود. به همین دلیل برای اندازه های مختلف شبکه بندی نتایج حل با یکدیگر مقایسه می گردد. در این پژوهش، هندسه مورد نظر با سایز ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ متر شبکه بندی شد و نتایج حل دما در شرایط بدون باد در ارتفاع ۲ متری درون راه پله با مقدار حرارت آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در ۱۲۰ ثانیه با یکدیگر مقایسه گردید. در شکل ۲، نتایج دما در این شبکه بندی ها مشخص شده است. همان طور که از شکل مشخص می باشد، در سایز ۰/۲ و ۰/۱ متر تقریباً نمودارها بر روی هم منطبق شده اند. به همین دلیل حل برای شبکه بندی با سایز ۰/۲ متر انجام شد.

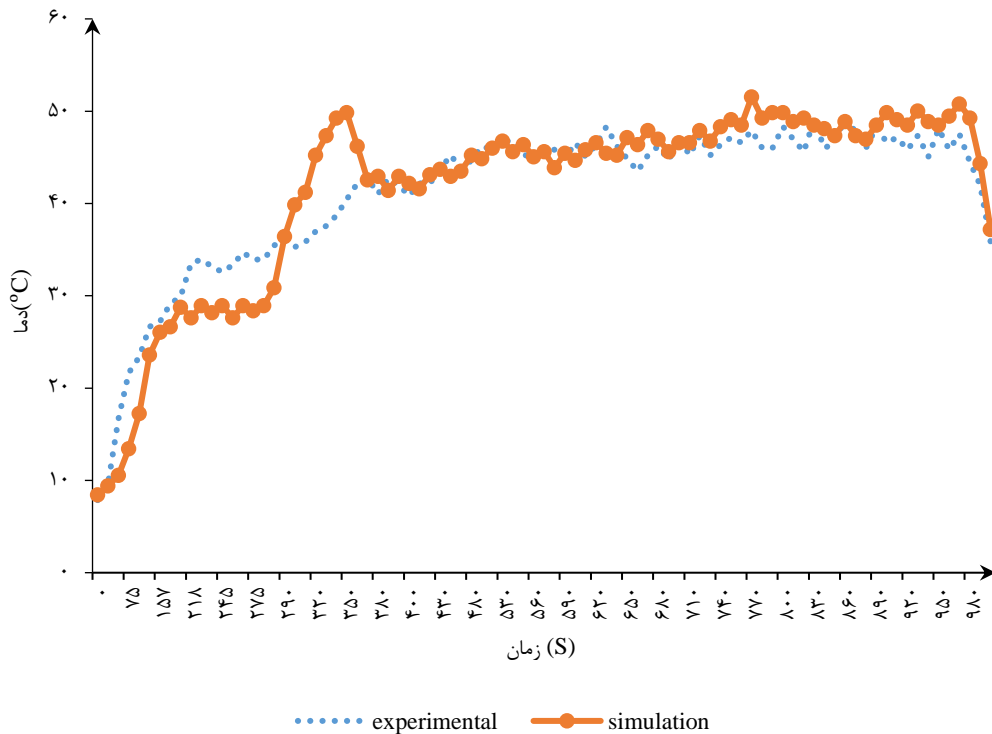


شکل ۲: نمودار دما در سایزهای مختلف شبکه

به دلیل اینکه در راه پله، تغییرات پارامترهای مورد نظر اهمیت دارد، شبکه محاسباتی غیریکنواخت انتخاب شد و در راه پله سایز شبکه ۰/۱ متر در نظر گرفته شد.

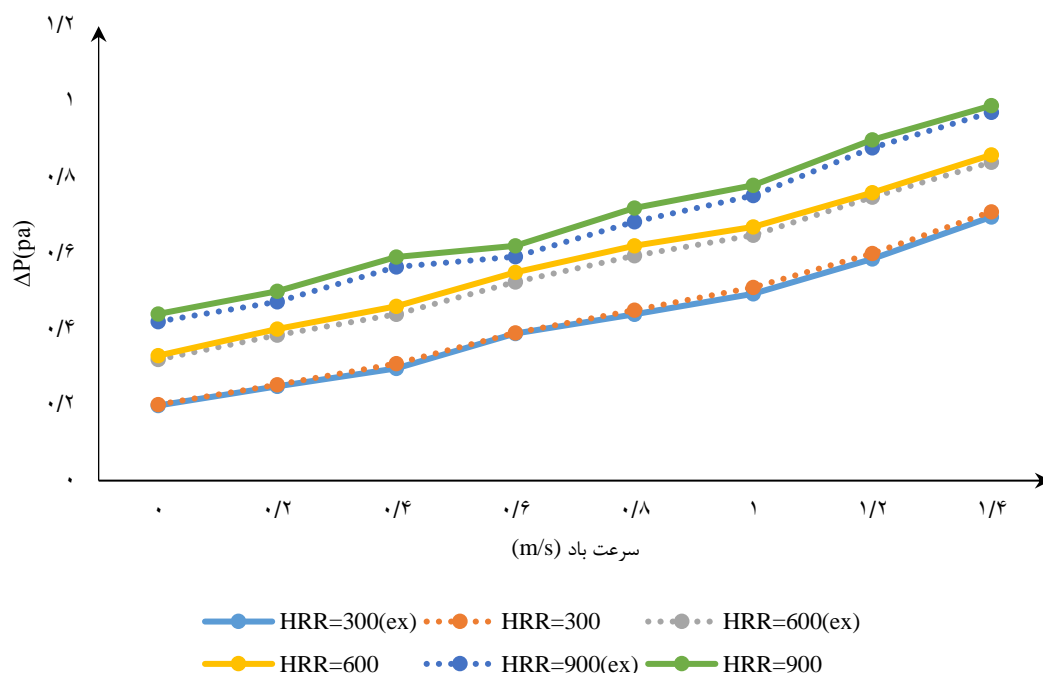
۴- نتایج و بحثها

در این پژوهش برای بررسی حریق در راه پله مورد نظر سناریوهای مختلف در نظر گرفته شد. گرمای آزاد شده ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ کیلووات فرض شد. برای هر کدام از سه حالت گرمای آزاد شده سرعت باد بین ۰ تا ۱/۲ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به دما، غلظت کربن مونوکسید و اختلاف فشار در نمودارهای مختلف ارائه شده است. شکل ۳ مقایسه نتایج دمای آزمایشگاهی ژاو و همکاران با نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. در این شکل دما در راه پله در ارتفاع ۲/۹ متری با گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات با یکدیگر مقایسه شده است. در این حالت سرعت باد ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همان طور که از شکل ۳ مشخص است نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی حاصل از شبیه سازی با هم مطابقت دارند. از شکل مشاهده می شود که دمای داخل شافت به سرعت پس از احتراق افزایش می یابد، که نشان می دهد دود داغ در داخل شافت جریان می یابد که دود توسط شناوری و اثر دودکشی حرکت می کند. درجه حرارت در شافت به سرعت افزایش می یابد تا اینکه حالت پایدار در ۴۰۰ ثانیه به دست می آید.



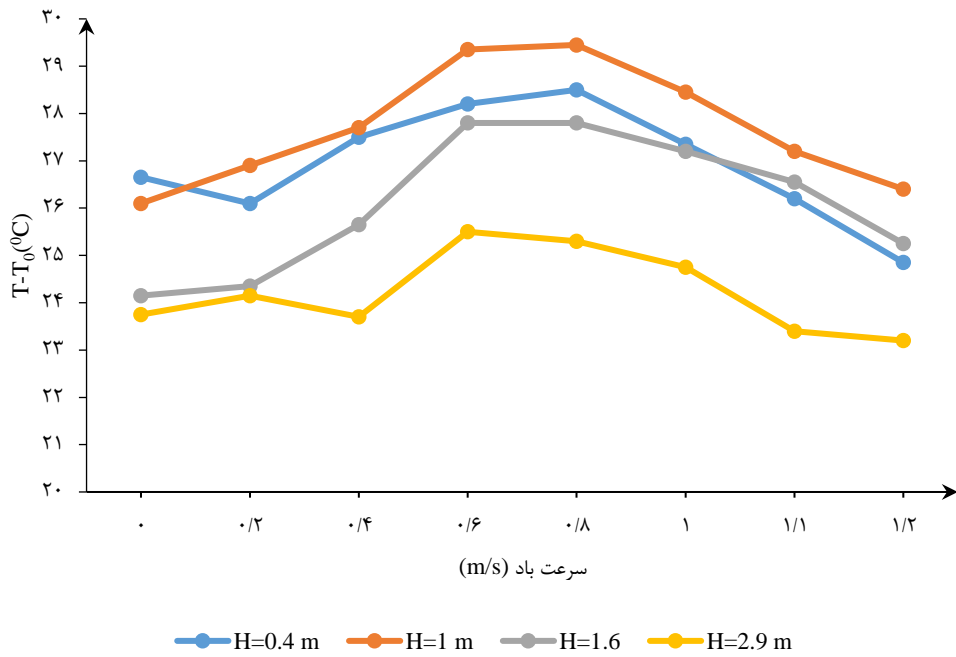
شکل ۳: مقایسه دمای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در ارتفاع ۲/۹ متری با گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه

با توجه به اینکه داده‌های آزمایشگاهی زاو و همکاران و داده‌های نرم‌افزاری مطابقت داشتند در ادامه نتایج مختلف نرم‌افزاری برای هندسه مورد نظر ارائه شده است. شکل ۴، اختلاف فشار محاسبه شده در پایین با سرعت باد را در حالت آزمایشگاهی و عددی مقایسه می‌کند. اختلاف فشار، اختلاف فشار حرارتی و افت فشار ناشی از باد جانبی خارجی است که با سرعت باد خارجی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای محاسبه اختلاف فشار از رابطه (۶) استفاده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشگاهی زاو و همکاران با داده‌های عددی بدست آمده مطابقت دارند و حدود ۵٪ اختلاف دارند. با توجه به نتایج، با افزایش سرعت باد و افزایش گرمای آزاد شده اختلاف فشار افزایش می‌یابد. بر اساس تحلیل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که باد خارجی جانبی اثر دودکشی را تقویت کرده و موجب انتشار گازهای داغ درون راه‌پله می‌شود.

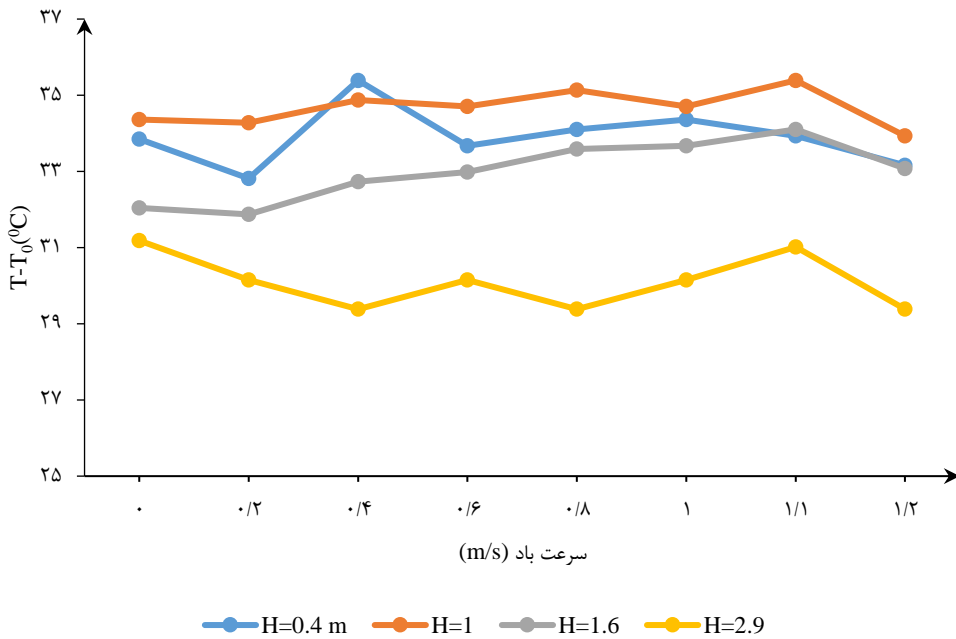


شکل ۴: مقایسه اختلاف فشار درب پایین با سرعت باد در حالت آزمایشگاهی و عددی با گرمای آزاد شده متفاوت

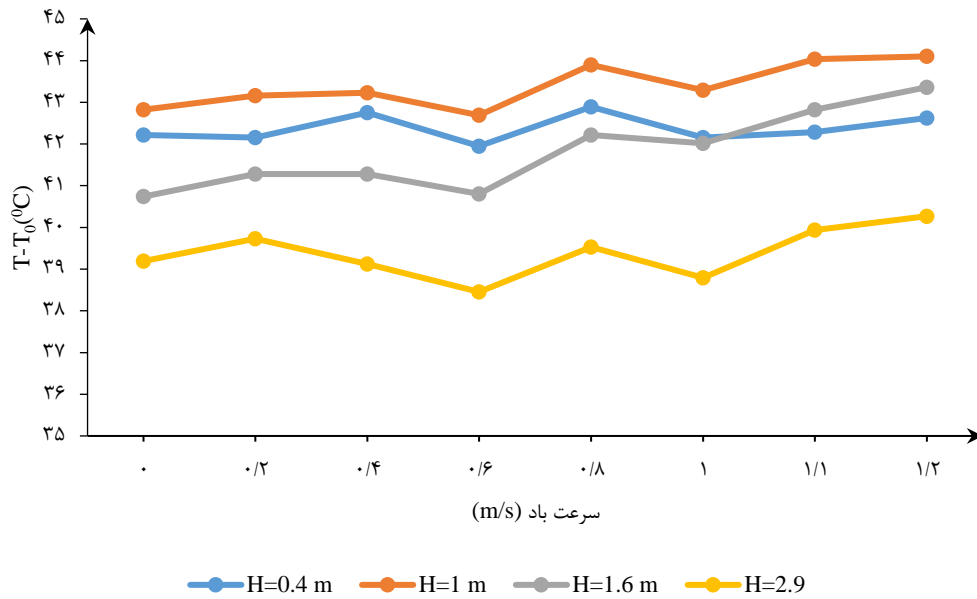
در شکل 5a، 5b و 5c دمای دود در سرعت‌های مختلف باد و گرمای آزاد شده متفاوت پس از گذشت ۳۰۰ ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. دما در راه‌پله در ارتفاع مختلف بررسی شد. مشاهده می‌شود که دما به طور یکنواخت در شافت توزیع شده و اختلاف آن کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد است. تغییرات دما با سرعت باد جانبی را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: برای گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات دمای ستون ابتدا به یک مقدار اوج می‌رسد سپس با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد. این را می‌توان توسط اثرات دوگانه باد جانبی توضیح داد. از یک طرف، هوای تازه استخراج شده در راهرو تبخیر سوخت را افزایش می‌دهد و احتراق را تشدید می‌کند که منجر به افزایش دمای ستون می‌شود. از طرفی هوای محیطی که به ستون وارد شده است یک اثر خنک‌کننده قوی دارد. همچنین زمانی که سرعت باد بالا است می‌تواند باعث انتقال حرارت همرفتی قوی از ستون به مرزها شود. در اینجا، اثر خنک‌کنندگی باد می‌تواند دما را کاهش دهد. در گرمای آزاد شده بیشتر به نظر می‌رسد که تغییرات دما در محدوده سرعت باد مشهود نیست. دلیل این امر، افزایش گرمای آزاد شده بر اثر خنک‌کنندگی باد تأثیر می‌گذارد و دما در این محدوده سرعت باد کاهش نمی‌یابد. همچنین نتایج نشان داد گرمای آزاد شده بر پیک دمایی مؤثر بوده است.



شکل 5a: دمای دود در گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات با سرعت باد مختلف در زمان ۳۰۰ ثانیه

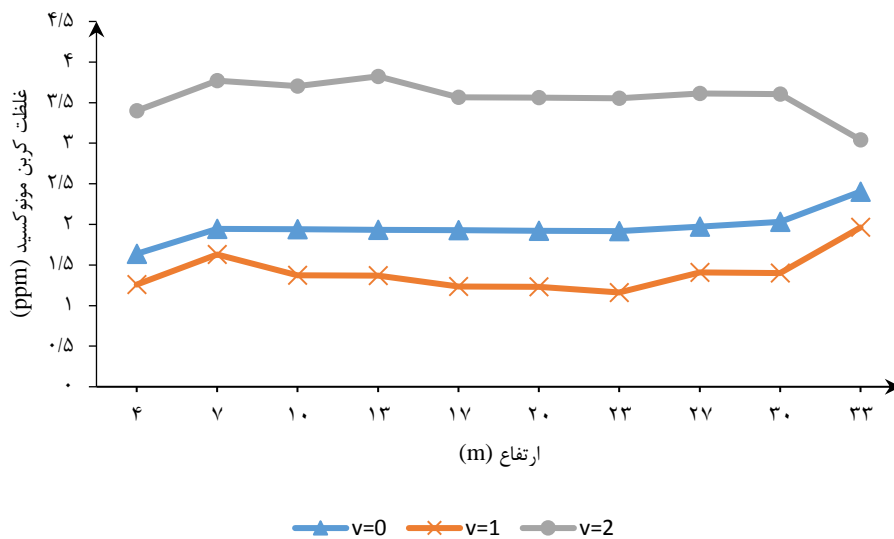


شکل 5b: دمای دود در گرمای آزاد شده ۶۰۰ کیلووات در سرعت باد مختلف در زمان ۳۰۰ ثانیه

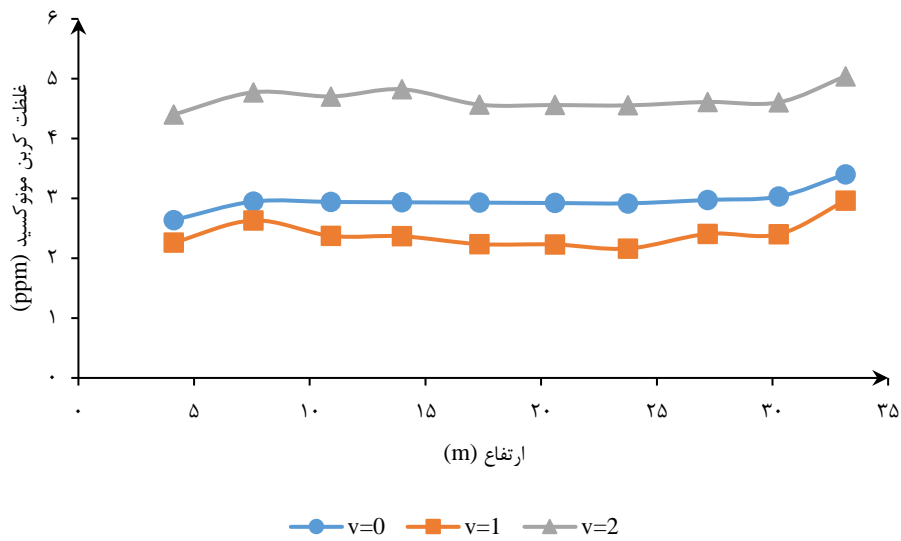


شکل 5c: دمای دود در گرمای آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در مختلف در زمان ۳۰۰ ثانیه

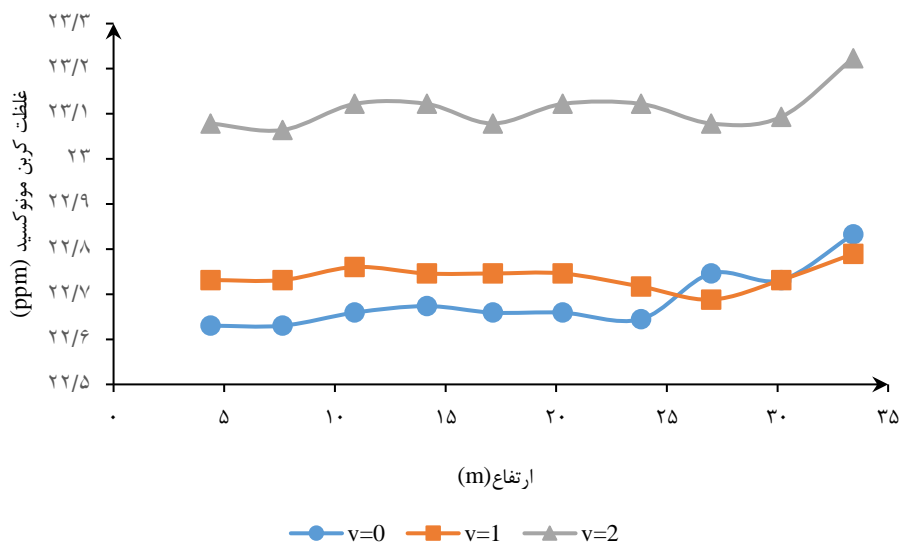
گازهای سمی علت اصلی مرگ و میر در آتش‌سوزی‌ها می‌باشد. در شکل 6a، 6b و 6c غلظت کربن مونوکسید در سرعت‌های مختلف باد و گرمای آزاد شده متفاوت بررسی شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت کربن مونوکسید به طور یکنواخت در راه‌پله با توجه به باد خارجی توزیع شده است. در هنگام باد، دود کندتر به سمت بالا حرکت می‌کند و باد مانع جریان هوای ناکافی به دلیل کاهش فشار از درب ورودی می‌شود، در نتیجه غلظت کربن مونوکسید بیشتر می‌گردد. با توجه به اینکه منبع آتش در نزدیکی درب قرار دارد، کاهش جریان هوای درب ورودی، تأثیر مستقیمی بر احتراق ناقص و تولید بیشتر گاز کربن مونوکسید دارد. با افزایش ارتفاع راه‌پله مقدار غلظت دود افزایش می‌یابد. از نتایج بدست آمده مشخص شد اگر گرمای آزاد شده ثابت باشد، غلظت کربن مونوکسید با افزایش سرعت باد خارجی افزایش می‌یابد. در سرعت باد ۱/۲ متر بر ثانیه غلظت کربن مونوکسید، تقریباً ۰.۳٪ نسبت به حالت بدون باد بیشتر است.



شکل 6a: غلظت دود در گرمای آزاد شده ۳۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه



شکل 6b: غلظت دود در گرمای آزاد شده ۶۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه



شکل 6c: غلظت دود در گرمای آزاد شده ۹۰۰ کیلووات در زمان ۳۰۰ ثانیه

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش پخش دود، دمای دود و خصوصیات حرئق در یک راه‌پله یا شافت یک ساختمان بلند در معرض باد جانبی محیطی مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی زاو و همکاران مقایسه گردید. نتایج این پژوهش برای مهندسان و آتش‌نشان‌ها در طراحی سیستم کنترل دود حرئق و خروج افراد گیرافتاده در حرئق با توجه به تاثیر باد جانبی بسیار اهمیت دارد.

هنگامی که باد خارجی به پنجره بالایی راه‌پله یا شافت می‌وزد، کاهش فشار رخ می‌دهد. با توجه به جریان باد از درب ورودی، به دلیل افت فشار دود به سمت راه‌پله حرکت می‌کند. افزایش سرعت باد و کاهش فشار بیشتر، منجر به انتشار سریعتر

دود می‌شود. با توجه به کاهش فشار میزان هوای وارد شده از درب ورودی کاهش می‌یابد که موجب احتراق ناقص می‌گردد. با توجه به احتراق ناقص، غلظت گاز سمی کربن مونوکسید افزایش می‌یابد. با افزایش گازهای سمی افراد بسیار در معرض خطر قرار گرفته و می‌بایست با سرعت بیشتری ساختمان تخلیه شود.

فهرست علامت‌ها

علائم انگلیسی	
C_p	[J/kg.K]: گرمای ویژه در فشار ثابت
D^*	طول مشخصه
\dot{m}_b'''	[kg/m ³ .s]: نرخ تولید گازهای در حال سوختن
\dot{Q}	[W/m ²]: نرخ حرارت آزاد شده
\dot{q}''	[W/m ²]: شار حرارتی
\dot{q}'''	[W/m ³]: نرخ حرارت آزاد شده بر واحد حجم
\dot{q}_b'''	[W/m ³]: شار حرارتی به کار گرفته شده از طریق گازهای در حال سوختن برای احتراق و ادامه فرآیند سوختن
R	[J/kg.K]: ثابت گاز کامل
T_∞	[K]: دمای محیط
v	[m/s]: سرعت باد
علائم یونانی	
ρ	[kg/m ³]: چگالی
ε	[W/m ³]: نرخ اتلاف
τ_{ij}	[N/m ²]: تانسور تنش برشی

واژه‌نامه

انگلیسی	فارسی
Fire	حریق
Evacuation	تخلیه
Evacuatiuon management	مدیریت تخلیه
Stack effect	اثر دودکشی
Turbulent flow	جریان آشفته
Spreading smoke	گسترش دود
Plume	توده دود
Ventilation	تهویه
Large eddy	گردابه‌های بزرگ
Side wind	باد جانبی
Heat release	گرمای آزاد شده

- [1] X. Wang, C. Fleischmann, and M. Spearpoint, "Applying the FDS pyrolysis model to predict heat release rate in small-scale forced ventilation tunnel experiments," *Fire Saf. J.*, vol. 112, pp. 102946, (2020).
- [2] B. Manzoor, I. Othman, and A. Waheed, "Accidental safety factors and prevention techniques for high-rise building projects – A review," *Ain Shams Engineering Journal.*, vol. 13, no. 5, pp. 101723, (2022).
- [3] H. W. Yao, W. L. Dong, D. Liang, A. Rogner, and J. W. Lai, "Simulation of full-scale smoke control in atrium." in *Procedia Engineering.*, vol. 1, no. 11, pp. 608-613, (2011).
- [4] X. Q. Sun, L. H. Hu, W. K. Chow, Y. Xu, and F. Li, "A theoretical model to predict plume rise in shaft generated by growing compartment fire," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 4, pp.910-920, (2011).
- [5] H. Omrany, A. Ghaffarianhoseini, R. Chang, A. Ghaffarianhoseini, and F. Pour Rahimian, "Applications of Building information modelling in the early design stage of high-rise buildings," *Automation in Construction.*, vol. 1, no. 152, pp.104934, (2023).
- [6] W. X. Shi, J. Ji, J. H. Sun, S. M. Lo, L. J. Li, and X. Y. Yuan, "Experimental study on influence of stack effect on fire in the compartment adjacent to stairwell of high rise building," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 20, no. 1, pp. 121-131, (2014).
- [7] D. Qi, L. Wang, and R. Zmeureanu, "The Effects of Non-uniform Temperature Distribution on Neutral Plane Level in Non-adiabatic High-Rise Shafts During Fires," *Fire Technol.*, vol. 53, no.1, pp. 153-172, (2017).
- [8] J. Ji, L. J. Li, W. X. Shi, C. G. Fan, and J. H. Sun, "Experimental investigation on the rising characteristics of the fire-induced buoyant plume in stairwells," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 64, no. 1, pp. 193-201, (2013).
- [9] L. J. Li, J. Ji, W. X. Shi, Z. H. Gao, J. H. Sun, and J. P. Zhu, "A modified turbulent mixing model with the consideration of heat transfer between hot buoyant plume and sidewalls in a closed stairwell," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 84, no. 1, pp. 521-528, (2015).
- [10] L. Xue, S. Yuan, and Q. He, "A Comparative Study on the Influence of Ventilation on Weather- and Fire-Induced Stack Effect in the Elevator Shafts of a High-Rise Building," *Fire Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 163-186, (2018).
- [11] J. Ji, X. Yuan, K. Li, L. Yang, and J. Sun, "A mathematical model for burning rate of n-heptane pool fires under external wind conditions in long passage connected to a shaft," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 116, no. 1, pp. 91-99, (2017).
- [12] L. Hu, X. Sun, X. Zhang, and F. Ren, "Facade flame height and horizontal extending distance from opening of compartment fire with external sideward wind," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 37, no. 3, pp. 3859-3867, (2019).
- [13] J. Ji, Y. Y. Fu, C. G. Fan, Z. H. Gao, and K. Y. Li, "An experimental investigation on thermal characteristics of sidewall fires in corridor-like structures with varying width," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 84, no. 1, pp. 562-570, (2015).
- [14] H. Kikuchi, Y. Tamura, H. Ueda, and K. Hibi, "Dynamic wind pressures acting on a tall building model - Proper orthogonal decomposition," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*,

- vol. 69, no. 1, pp. 631–649, (1997).
- [15] H. Chen, N. Liu, and W. Chow, “Wind effects on smoke motion and temperature of ventilation-controlled fire in a two-vent compartment,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 12, pp. 2521-2526, (2009).
- [16] M. Li, Z. Gao, J. Ji, K. Li, and J. Sun, “Wind effects on flame projection probability from a compartment with opposing openings,” *Fire Saf. J.*, vol. 91, pp. 414-421, (2017).
- [17] J. Ji, X. Yuan, K. Li, and J. Sun, “Influence of the external wind on flame shapes of n-heptane pool fires in long passage connected to a shaft.” *Combust. Flame.* vol. 162, no. 5, pp. 2097-2107, (2015).
- [18] O. Sugawa, D. Momita, and W. Takahashi, “Flow Behavior Of Ejected Fire Flamelplume From An Opening Effected By External Side Wind,” *Fire Saf. Sci.*, vol. 5, pp. 249-260, (1997).
- [19] L. Zhu, X. Yuan, Z. Gao, and J. Ji, “Experimental Investigation of Effect of External Side Wind on Fire Behaviors in a Corridor Connected to a Shaft,” *Fire Technol.*, vol. 56, no. 2, pp. 863-881, (2020).
- [20] J. Ji, L. Zhu, L. Ding, L. Yu, and H. Wan, “Numerical Investigation of External Wind Effect on Smoke Characteristics in a Stairwell,” *Fire Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 1681–1702, (2020).
- [21] S. C. Li, Y. Chen, X. Chen, and G. G. Jing, “Engineering numerical simulation on the amount of make-up air for mechanical smoke exhaust in atrium,” in *Procedia Engineering.*, vol. 1, no. 11, pp. 379-384, (2011).
- [22] S. Lu, Y. H. Wang, R. F. Zhang, and H. P. Zhang, “Numerical study on impulse ventilation for smoke control in an underground car park,” in *Procedia Engineering.* vol. 1, no. 11, pp. 369-374, (2011).
- [23] P. A. Enright, “Impact of jet fan ventilation systems on sprinkler activation,” *Case Stud. Fire Saf.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, (2014).
- [24] W. Zhang, A. Hamer, M. Klassen, D. Carpenter, and R. Roby, “Turbulence statistics in a fire room model by large eddy simulation,” *Fire Saf. J.*, vol. 37, no. 8, pp. 721-752, (2002).
- [25] Z. Gao, X. Yuan, J. Ji, Y. Li, and L. Yang, “Influence of stack effect on flame shapes of gas burner fires,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, no. 25, pp. 1574-1581, (2017).
- [26] Z. Nurizaty *et al.* “Experimental Investigation on Post-Fire Performances of Fly Ash Concrete Filled Hollow Steel Column,” *Int. J. High-Rise Build.*, vol. 10, no. 4, pp. 335-344, (2021).
- [27] V. Kodur, P. Kumar, and M. M. Rafi, “Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety,” *PSU Res. Rev.*, vol. 4, No, 1, pp. 1-23, (2020)

نسخه پیش از انتشار