

# Numerical Modeling for transport and distribution of carbon monoxide plumes in indoor spaces

## Distribution of CO plumes in indoor spaces

### Adeleh Abdi

Master student, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

### Ozeair Abessi

\* Assistant professor, Department of Environment, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran (Corresponding Author):

Email: Oabessi@nit.ac.ir,

### Ehsan Khavasi

Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Iran

Received: 2022/04/21

Accepted: 2022/07/01

**Document Type:** Research article

## ABSTRACT

**Background and Purpose:** More than 90% of people's lives are spent indoors and indoor air pollution is the cause of more than 2.2 million deaths annually worldwide. Contrary to popular belief, the dangers of pollutants in enclosed spaces are greater than in open environments. In this study, the ability of the computer models to simulate flow behavior in the interior space of an industrial workshop was investigated to may check the satisfaction of the environmental standards

**Materials and Methods:** The flow pattern and flow mixing and dilution were investigated by developing a specific solver in OpenFOAM and comparing the results with the experimental data.

**Results:** Due to the initial buoyancy, the plume enters from the lower opening with high concentration and after diluting in indoor space, goes out from the roof opening. It is then observed that while there are no openings, the concentration of Carbon Monoxide in the breathing height of workers will reach the dangerous limit of (100 ppm <) in different models.

**Conclusion:** In this study, the concentration of Carbon Monoxide in the building's interior space was estimated far higher than the maximum allowable concentration mentioned in the standards. Therefore, the high level of pollution concentration in indoor spaces indicates the inadequacy of natural ventilation and the need for mechanical ventilation to could decrease pollution down to the breathing standard of occupants.

**Keywords:** Light pollutant; Transmission; Openfoam; Natural Ventilation; Carbon monoxide.

► **Citation:** Abdi A, Abessi O, Khavasi E. Numerical Modeling for transport and distribution of carbon monoxide plumes in indoor spaces Distribution of CO plumes in indoor spaces. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Autumn 2022; 8(3): 233-248.

## مدل سازی عددی پخش و انتقال پلوم مونوکسید کربن در داخل ساختمان پخش پلوم CO در داخل ساختمان

### چکیده

**زمینه و هدف:** بیش از ۹۰٪ زندگی افراد در محیط‌های داخل ساختمان سپری می‌شود و آلودگی هوای داخل ساختمان، عامل سالانه بیش از ۲/۲ میلیون مرگ‌ومیر در سطح جهان است. برخلاف تصورات رایج مردم، خطرات ناشی از آلاینده‌ها در مکان‌های بسته بیشتر از محیط‌های باز است. مطالعه حاضر با هدف بررسی توانایی کامپیوتر در شبیه‌سازی رفتار جریان در فضای داخل ساختمان و ارزیابی امکان ارضای استانداردهای موجود انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** الگوی جریان و نحوه اختلاط و رقیق‌سازی پلوم از طریق توسعه یک حلگر در نرم‌افزار متن باز اوپن فوم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه گردید. **یافته‌ها:** به‌علت شناوری مثبت پلوم مونوکسیدکربن، جریان ورودی از کف ساختمان، پس از صعود و پخش در فضای داخلی کارگاه، در نهایت از پنجره سقفی آن به خارج هدایت می‌گردد؛ به این ترتیب مشاهده شده است که در شرایط عدم وجود بازشوهای جانبی، میزان غلظت مونوکسیدکربن در ارتفاع تنفسی کارگران در مدل‌های مختلف مورد آزمون، به حد بسیار خطرناک (بیشتر از ۱۰۰ ppm) می‌رسد. **نتیجه‌گیری:** در این مطالعه غلظت آلاینده مونوکسیدکربن در فضای داخلی ساختمان بسیار فراتر از حداکثر مقدار مجاز توصیه شده در استانداردهای موجود برآورد شد. بررسی غلظت آلودگی در فضای داخلی کارگاه بیانگر عدم کفایت تهویه طبیعی برای شرایط حاضر و لزوم استفاده از روش‌های مکانیکی جهت کاهش غلظت بالای آلودگی تا سطح استاندارد تنفسی افراد شاغل در آن است.

**کلید واژه‌ها:** آلاینده سبک، انتقال، اوپن فوم، تهویه طبیعی، مونوکسید کربن

عادلہ عبدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران محیط زیست، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

عزیز عابسی

\* استادیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران. (نویسنده مسئول):

Email: Oabessi@nit.ac.ir

احسان خواصی

استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

امروزه بخشی مهمی از نگرانی عمده جوامع بشری معطوف به حفاظت از محیط زیست است؛ از این رو رعایت معیارهای محیط زیستی با هدف حفظ کیفیت زندگی انسان بر روی کره زمین، به یکی از دغدغه‌های مهم و جدی بشر تبدیل شده است. در دنیای کنونی افزایش آلاینده‌ها در محیط زندگی، به یکی از مهم‌ترین مشکلات انسان تبدیل شده است. در این میان، آلودگی هوا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ چراکه در یک لحظه، ده‌ها هزار نفر همزمان از یک آلودگی رنج برده و آسیب می‌بینند. بحث آلودگی هوا، بحث در مورد مواد و ترکیباتی است که از منابع مختلف طبیعی و ساخته دست بشر تولید شده و وارد هوا می‌گردند؛ به طوری که باعث تغییرات نامطلوب در خواص فیزیکی و شیمیایی اتمسفر یا فضای تنفسی انسان گردد. آلودگی هوا هم در محیط‌های باز شهری و هم در محیط‌های بسته، به‌طور گسترده بر زندگی افراد تأثیر می‌گذارند؛ به طوری که کاهش کیفیت هوا، چهارمین عامل مرگ‌ومیر در جهان شناخته می‌شود (۱). آلودگی هوا سالانه منجر به مرگ زودرس حدود ۳ میلیون نفر در سطح دنیا می‌شود که حدود ۶٪ مرگ‌ومیر سالانه در سطح جهان را تشکیل می‌دهد. در ایران نیز ۱۰٪ مرگ‌ومیر سالیانه، به دلیل عواقب ناشی از آلودگی هوا گزارش شده است که حدود دو سوم آن، ناشی از آلودگی در محیط‌های سرپسته است. وجود منابع گرمایشی غیراستاندارد، تراکم و نزدیکی بیش از حد ساختمان‌ها، عدم تهویه مناسب هوا به‌منظور جلوگیری از اصراف انرژی، استفاده از مواد مصنوعی و شیمیایی در ساختمان، مبلمان و وسایل شخصی و استفاده از حشره‌کش‌ها، مواد شوینده، تمیز کننده، خوشبو کننده و ضدعفونی کننده، از جمله عوامل افزایش آلودگی هوا در داخل ساختمان می‌باشند، اما همواره منابع نقطه‌ای آلودگی هوا در داخل ساختمان‌ها، سهم مهم‌تری از حوادث مرگ‌بار مرتبط با آلودگی محلی هوا را رقم زده‌اند. در سال ۱۳۸۸ در ایران، به‌تنهایی ۷۶۹ نفر بر اثر مسمومیت با گاز مونوکسیدکربن (CO) در خانه یا محل

کار جان خود را از دست دادند. مونوکسیدکربن، یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین گازهای تولید شده در منازل و محیط‌های صنعتی است. این گاز بی‌رنگ، بی‌بو و فاقد طعم است و بر اثر احتراق ناقص زغال و سوخت‌های فسیلی تولید می‌گردد. میل ترکیبی مونوکسیدکربن با هموگلوبین (Hb<sup>2</sup>) خون حدود ۲۲۰ برابر بیشتر از میل ترکیب گاز اکسیژن است. مولکول مونوکسیدکربن با عبور از غشاء مویرگی ریه و ترکیب با مولکول هموگلوبین، کربوکسی هموگلوبین (COHb) که عامل کاهش ظرفیت انتقال اکسیژن به بدن است را ایجاد می‌کند (۲). این امر باعث خواب آلودگی و احساس خستگی مفرط شده و می‌تواند انسان را بیهوش کند. مونوکسیدکربن در غلظت‌های متفاوت، اثرات منفی متفاوتی بر سلامت انسان می‌گذارد و قرار گرفتن افراد در معرض آن حتی در غلظت‌های پایین، برای مدت زمان طولانی می‌تواند بسیار خطرناک باشد و مشکلات مزمنی برای سلامتی انسان به‌دنبال داشته باشد. محیط‌های متراکم شهری، تغییر سبک زندگی و توسعه اشکال خاصی از تکنولوژی ارتباطی و صنعتی باعث شده است که انسان بیشتر وقت خود را در محیط‌های داخل ساختمان سپری کند؛ به طوری که در حال حاضر انسان ۹۰-۷۰٪ وقت خود را در محیط‌های شخصی یا کاری محدود شده یا بسته، سپری می‌کند. در این زمینه سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا برآورد نموده است که ۲۰-۱۰ میلیون آمریکایی از سندرم بنای بیمار یا عوارض زائل‌کننده سلامتی ناشی از هوای داخلی آلوده، در عذاب هستند که مشکلات تنفسی مزمن، عفونت سینوس‌ها، سردرد، کهیر زدن پوست، سوزش چشم، تهوع و خستگی را به‌دنبال دارد. در کارگاه‌های صنعتی، غلظت‌های متفاوتی از مونوکسیدکربن طی فرآیند احتراق و مصرف سوخت‌های فسیلی تولید می‌گردند. غلظت‌هایی متغیر از ۲۰,۰۰۰ ppm تا ۵۰۰,۰۰۰ ppm در احتراق مواد جامد و سوخت‌های مایع گزارش شده است. در محیط‌های صنعتی حداکثر مقدار مجاز مونوکسیدکربن بر اساس استاندارد

استفاده از روش‌های هیدرولیک محاسباتی بوده که در سال‌های اخیر در قالب بسته‌های نرم‌افزاری تجاری یا تحقیقاتی اعم از فلونت<sup>۱</sup> و اوپن فوم<sup>۲</sup> توسعه داده شده‌اند. در این زمینه می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود.

لم و چان، توزیع و حرکت هوا در یک سالن ژیمناستیک در هنگ‌کنگ را مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده نمودند که مکان درجه خروجی هوا، تأثیر زیادی در لایه‌بندی دمایی سالن دارد و این موضوع، شاخص بار سرمایی سالیانه سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این زمینه اختلاف دمای بسیار زیاد در ناحیه اسکان، از جمله مسائل اساسی آسایش حرارتی است که سیستم‌های توزیع هوای زیرسطحی با آن مواجه هستند (۴). ژانگ و فرانا با شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان هوای داخلی با استفاده از نرم‌افزار اوپن فوم، تأثیر فاصله بین دیوار سرد شده و مبدل حرارتی بر روی توزیع دما و توزیع سرعت در یک محفظه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه و نتیجه گرفته شد که مدل عددی دقت کافی داشته و الگوی جریان در اتاق را به درستی پیش‌بینی می‌نماید (۶). لیمان و همکاران، جهت مطالعه گرماسنجی جریان هوا در یک حفره مستطیلی، اقدام به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان نمودند. این تحقیق به منظور تعیین بهترین تهویه هوا، ارزیابی کیفیت هوا و آسایش حرارتی در حفره انجام گرفت. تراکم‌ناپذیری جریان توسط ۴ حلگر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و همچنین تأثیر نیروی شناوری بر معادله ایده‌آل گاز حالت و تقریب بوزینسک مورد بررسی قرار گرفت (۷). کینگ به منظور مطالعه جریان ایزوترمال هوا در محیط داخلی و اطراف یک سازه مکعبی، قابلیت‌های نرم‌افزارهای اوپن فوم و انسیس فلونت در مدل‌سازی کامپیوتری جریان را مورد بررسی قرار داد و نتایج حاصل را با کارهای آزمایشگاهی مقایسه نمود (۸). در این تحقیق تهویه ساختمان در ۸ وجه و بر اساس فشارهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده، دقت شبیه‌سازی در هر دو مدل را برای جریان هوا در اطراف و داخل سازه‌های مکعبی نشان داد. با وجود مش‌بندی‌های متفاوت

سازمان مهندسی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا (ASHRAE) برابر ۵۰ ppm برای ۸ ساعت تدوین شده است، اما در کارگاه‌ها غلظت این آلاینده عمدتاً از سطح ۱۰۰ ppm هم تجاوز می‌نماید (۳). تهویه هوای بسته ساختمان، همواره به عنوان بهترین راهکار برای مقابله با غلظت بالای آلاینده‌ها در داخل ساختمان معرفی شده است. در این زمینه، شناسایی رفتار منبع آلودگی و مدل‌سازی انتقال و انتشار آلودگی در فضای داخل ساختمان، دارای اهمیت ویژه‌ای است (۴).

تهویه هوا در داخل ساختمان می‌تواند به دو صورت مصنوعی (با استفاده از فن و تأسیسات تصفیه مکانیکی) و طبیعی (با کمک باد و بازشوها و نیروی شناوری منبع آلاینده) انجام گیرد (۵). با توجه به هزینه بالای تأسیسات مکانیکی، در ساختمان‌های بزرگ و کارگاه صنعتی، تمایل بیشتر به استفاده از روش‌های طبیعی و نیروهای خودکار طبیعت است. از این رو طراحی مناسب بازشوهای ساختمان و جانمایی درست منابع آلودگی در کارگاه جهت بهره‌برداری حداکثری از قدرت تهویه طبیعی همواره مورد توجه بوده است. نیروی باد، سرعت اولیه منبع و شناوری پلوم آلودگی ناشی از چگالی کمتر یا بیشتر آن نسبت به هوای محیط، اصلی‌ترین نیروهای تأثیرگذار در روند تهویه طبیعی آلاینده‌ها در داخل ساختمان محسوب می‌گردند. در بدترین سناریو، تهویه طبیعی می‌تواند در شرایط عدم حضور جریان محیطی یا باد صورت پذیرد که این موضوع، تجمع آلودگی در داخل ساختمان و عدم ارضای استانداردهای کیفی هوا برای تنفس را به دنبال خواهد داشت.

به منظور پیش‌بینی رفتار جریان در محیط، استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و یا انجام تحقیقات میدانی از دیرباز مورد توجه بوده است. در سال‌های اخیر با توسعه کامپیوترهای شخصی و نرم‌افزارهای تجاری و تحقیقاتی نوین، استفاده از مدل‌های کامپیوتری جهت پیش‌بینی روند پخشیدگی و اختلاط آلودگی در داخل ساختمان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های کامپیوتری عمدتاً مبتنی بر شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان با

2. fluent  
3. openfoam

1. The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

### معادلات حاکم

تمام پدیده‌های فیزیکی در محیط مادی در اثر وجود نیرو یا نیروهایی شکل می‌گیرند. مدل‌سازی این پدیده‌ها با شناخت نیروهای مؤثر و ارائه تصویری ریاضی از آنها انجام می‌گیرد. اصول فیزیکی حاکم بر رفتار جریان هوا در داخل ساختمان در قالب معادلات حرکت سیال، انتقال حرارت و انتقال گونه به هم پیوند می‌خورند؛ به این ترتیب معادلات حاکم بر پخشیدگی و اختلاط سیالات در محیط شامل جمیع معادلات بقای جرم یا پیوستگی، معادلات بقای مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس) و معادلات بقای غلظت و انرژی به شرح زیر می‌باشند.

معادله پیوستگی یا معادله بقای جرم به صورت عمومی برای جریان‌های غیرماندگار و تراکم‌پذیر به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \text{رابطه ۱:}$$

جریان تراکم‌پذیر به جریانی گفته می‌شود که گرادیان یا تغییرات چگالی در آن قابل توجه باشد. عامل این گرادیان چگالی می‌بایست تغییر فشار باشد؛ بنابراین جریان‌هایی که تغییر چگالی ناشی از دما یا غلظت دارند، تراکم‌پذیر قلمداد نمی‌شوند، لذا تراکم‌پذیری و تراکم‌ناپذیری مفهومی وابسته به جریان است و نه ماهیت سیال. مادامی که هوا با سرعت کم جریان می‌یابد، تغییر در چگالی، مقدار کمتری دارد و جریان را می‌توان تراکم‌ناپذیر فرض نمود، ولی اگر چگالی سیال به دلیل سرعت یا فشار محلی جریان به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر نماید، آنگاه جریان تراکم‌پذیر در نظر گرفته می‌شود. در این زمینه، برای تعریف تراکم‌پذیری از نسبت سرعت جریان به سرعت صوت در سیال، که عدد ماخ نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد. اگر عدد ماخ جریان خیلی کوچک باشد، از اثر تراکم‌پذیری صرف نظر و بدون ایجاد خطای زیاد در نتایج، جریان تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود. مشابه مسأله حاضر این وضعیت در حالتی روی می‌دهد که سرعت محلی جریان در مقایسه با سرعت صوت ناچیز باشد. در شرایط ورود آلودگی به یک محیط بسته، به دلیل سرعت پایین، تغییر زیادی در چگالی هوا ناشی از فشار رخ

مشاهده شد در هر دو حلگر، مدل k-OmegaSST عملکرد مناسبی نشان داد. لیمان با استفاده از نرم‌افزار اوپن فوم، اقدام به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان هوا در ارتباط با انتقال حرارت و جرم در محوطه یک استخر سرپوشیده با هندسه پیچیده نمود. به منظور مدل‌سازی تأثیر شرایط آب‌وهوایی در کیفیت هوای داخلی استخر، شبیه‌سازی در دو حالت زمستان و تابستان انجام گرفت. با مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی، مشاهده شد که مدل توانایی دارد مقادیر سرعت هوا، دما و رطوبت را با تقریب خوبی پیش‌بینی نماید (۹).

در مطالعه حاضر کیفیت هوا در فضای محصور یک کارگاه صنعتی که دارای یک منبع نقطه‌ای از آلودگی گاز مونوکسیدکربن ناشی از فرآیندهای احتراقی بود، از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری مورد بررسی قرار گرفت. تهویه طبیعی ساختمان در شرایط عدم وجود باد و بازشوهای جانبی و تنها در شرایط حضور شارهای اولیه مومنتم و شناوری منبع در محیط‌های ساکن ارزیابی شده و نتایج از طریق مقایسه با مطالعات آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است.

### روش کار

به منظور مدل‌سازی انتقال و پخش آلاینده، از قابلیت‌های نرم‌افزار متن باز اوپن فوم برای شبیه‌سازی دینامیک رفتار جریان استفاده شده است. جهت اطمینان از توانایی و دقت مدل نسبت به اعتبارسنجی نتایج برای حالت ساکن اقدام شده و موارد مشابه از طریق سناریوپردازی حالات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. ابعاد سوله مورد مطالعه بر اساس مطالعات آزمایشگاهی حق‌گو و همکاران انتخاب شد (۱۰). این سوله، نمونه‌ای کوچک مقیاس شده از یک کارگاه صنعتی واقعی و دارای منبع آلودگی نقطه‌ای می‌باشد. در این تحقیق، توانایی سه مدل مجزای توربولانسی، مدل k-omega استاندارد و k-OmegaSST و k-epsilon، مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج با استانداردهای کیفی هوا در فضای داخلی ساختمان مورد مقایسه قرار گرفته است.

نخواهد داد. در این حالت، هرچند که سیال تراکم پذیر است، به دلیل آنکه تغییر چشم گیری در چگالی رخ نمی دهد، جریان را می توان تراکم ناپذیر فرض نمود؛ به این ترتیب معادله پیوستگی برای جریان ماندگار و تراکم ناپذیر به صورت ساده زیر بازنویسی می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{معادله ۲:}$$

فرم کلی معادله بقای مومنتم تحت عنوان معادلات ناویر-استوکس در این حالت برابر است با:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{eff} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \end{aligned}$$

$u, v, w$  به ترتیب مؤلفه های سرعت میانگین در راستاهای X

و Y، و Z می باشند.  $\rho_0$  و  $\rho$ ،  $t$ ،  $P$ ،  $V_{eff}$ ،  $g$  به ترتیب زمان، فشار هیدرودینامیک سیال، لزجت سینماتیک مؤثر یا جنبشی (مجموع لزجت سینماتیک مولکولی سیال و لزجت آشفته جریان)، شتاب گرانش، چگالی سیال و چگالی سیال مرجع هستند.

یکی از روش های رایج در بررسی جریان های آشفته، روش رینولدز در تجزیه پارامترهای سرعت به دو بخش متوسط زمانی و بخش نوسانی می باشد. با اعمال فرآیند متوسط گیری، تمامی ساختارهای اغتشاشی از جریان حذف شده و تغییرات سرعت متوسط و میدان فشار باقی می ماند. معادلات فوق طبق روش رینولدز میانگین گیری زمانی شده اند؛ بدین صورت که با استفاده از میانگین گیری زمانی، از اثر نوسانات حاصل از آشفتگی صرف نظر شده و تنها میانگین پارامترهای جریان مورد توجه قرار گرفته است. معادلات فوق را اصطلاحاً معادلات ناویر استوکس میانگین رینولدز (RANS) می نامند و در آن این میانگین رفتار جریان است که مهم بوده و اثرات

1. Reynolds-averaged Navier-Stokes

آشفتگی بر رفتار جریان به روش های ویژه ای مدل می گردد.

به طریق مشابه، معادله عمومی بقای غلظت که بیانگر روابط حاکم بر پخش و انتقال جرم در محیط است برابر خواهد بود با:

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u_j C_j \right) = (\rho \alpha_{eff} C_j) + q_c + R \quad \text{معادله ۴:}$$

و معادله عمومی بقای انرژی برابر است با:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j T_j \right) = (\lambda_{eff} T_j) + H \quad \text{معادله ۵:}$$

در معادلات فوق مقدار پخش گردابه ای غلظت ( $\alpha_{eff}$ ) و حرارت ( $\lambda_{eff}$ ) به شکل زیر از طریق عدد اشمیت ( $Sc$ ) و پرانتل ( $Pr$ )<sup>۲</sup> به لزجت مولکولی ( $\nu$ ) و گردابه ای ( $\nu_t$ ) مرتبط می شوند.

$$\alpha_{eff} = \frac{\nu_t}{Sc_t} + \frac{\nu_l}{Sc_l} \quad \text{معادله ۶:}$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\nu_t}{Pr_t} + \frac{\nu_l}{Pr_l} \quad \text{معادله ۷:}$$

در این روابط  $Sc_l$  و  $Sc_t$  به ترتیب عدد بی بعد اشمیت آشفته و مولکولی جریان و  $Pr_l$  و  $Pr_t$  عدد بی بعد پرانتل آشفته و مولکولی جریان هستند که به صورت زیر تعریف می گردند:

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D} = \quad \text{معادله ۸:}$$

$$\frac{\text{momentum diffusivity (kinematic viscosity)}}{\text{mass diffusivity}}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/c_p \rho} = \frac{c_p \mu}{k} = \quad \text{معادله ۹:}$$

$$\frac{\text{momentum diffusivity (kinematic viscosity)}}{\text{thermal diffusivity}}$$

در معادلات بالا  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی مولکولی<sup>۳</sup>،  $\nu_t$  ویسکوزیته آشفته<sup>۴</sup>،  $D$  دیفیوژن جرمی<sup>۵</sup>،  $\alpha$  انتشار حرارتی،  $\mu$  ویسکوزیته پویای سیال،  $k$  هدایت حرارتی<sup>۶</sup>،  $c_p$  گرمای خالص<sup>۷</sup> و  $\rho$  چگالی سیال<sup>۸</sup> می باشد؛ به این ترتیب عدد پرانتل یک عدد

2. Schmidt number  
3. Prandtl number  
4. Molecular Kinematic viscosity  
5. Turbulent viscosity  
6. Mass diffusion  
7. Thermal diffusion  
8. Dynamic fluid viscosity  
9. Thermal conductivity

استاندارد در نرم‌افزار تعبیه شده است، جهت مشاهده خروجی‌های مدل، امکان انتقال نتایج به نرم‌افزارهایی مانند Tecplot نیز مهیا شده است.

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار پلوم مونوکسید کربن در داخل ساختمان در شرایط عدم وجود باد یا جریانات جانبی، هندسه سوله شکل یک کارگاه صنعتی با سقف شیب‌دار به ابعاد  $30 \times 30$  سانتی‌متر و ارتفاع بیشینه ۳۵ سانتی‌متر به صورت شکل ۱ مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. سوله بدون پنجره و یا بازشدگی بوده و تنها دارای یک پنجره سقفی است. هندسه در مدل عددی حاضر عیناً مشابه مدل آزمایشگاهی حقگو و همکاران در نظر گرفته شد (۱۰) که مدلی کوچک با مقیاس ۱:۳۰ از یک نمونه واقعی می‌باشد. جریان آلاینده در مدل، پلومی با سرعت ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه و غلظتی برابر با  $20,000 \text{ ppm}$  از مونوکسید کربن با چگالی  $1/14$  کیلوگرم بر متر مکعب است که از طریق یک منبع نقطه‌ای ناشی از احتراق ناقص سوخت در مجاورت کف سالن خارج می‌شود. چگالی هوا محیط در این مسأله برای دمای ۲۵ درجه محیط  $1/225$  کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده (جدول ۱) و نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی حق‌گو و همکاران مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گرفت (۱۱). برای توسعه هندسه مدل از قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS و بخش Design Modeler آن استفاده شد.

جدول ۱. هندسه ساختمان و مشخصات جریان در مدل توسعه داده شده

مشخصات	شرایط مدل
$30 \times 30 \times 35$ (سانتیمتر مکعب)	ابعاد نمونه
۱/۳۰	مقیاس نمونه
۱۰ (سانتیمتر/ثانیه)	سرعت تخلیه
$20,000 \text{ ppm}$	غلظت نمونه
$1/14$ (کیلوگرم/مترمربع)	چگالی پلوم
$1/225$ (کیلوگرم/مترمربع)	چگالی محیط
۲۵ (سانتیگراد)	دما محیط
۱۰۵۶	عدد رینولدز
۲۵ (لیتر/ساعت)	دبی ورودی

بدون بعد است که بیانگر نسبت نفوذ اندازه حرکت به نفوذ حرارت در سیال یا جریان است و عدد اشمیت نسبت توانایی انتشار اندازه حرکت در سیال (یا جریان) به توانایی انتشار غلظت در آن را نشان می‌دهد. عدد اشمیت و پرانتل مولکولی خاصیتی مربوط به جنس سیال بوده، در حالی که عدد اشمیت و پرانتل آشفته خاصیتی مربوط به خصوصیات آشفته جریان است.

### مدل‌سازی جریان

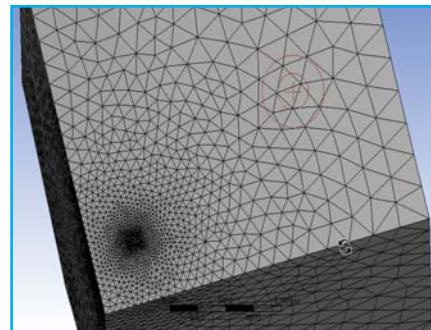
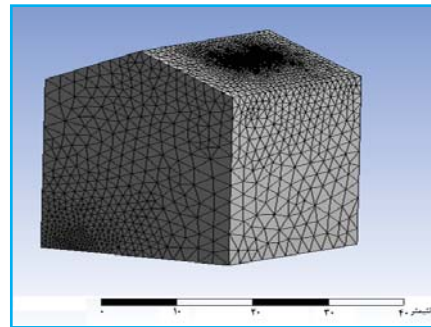
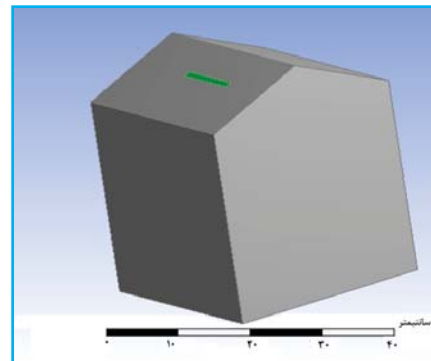
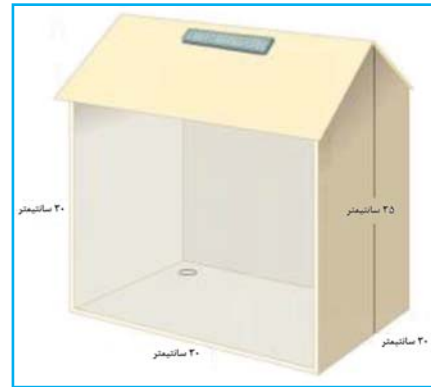
در پژوهش حاضر از مدل عددی متن باز این فوم برای شبیه‌سازی جریان پلوم آلودگی در ساختمان استفاده شد. نرم‌افزار این فوم، نسخه ۶، از معروف‌ترین مدل‌های توسعه داده شده برای حل مسائل هیدرولیک محاسباتی است. این مدل قابلیت مدل‌سازی جریان (آرام یا آشفته، تراکم‌پذیر یا تراکم‌ناپذیر، لزج یا غیرلزج، ماندگار یا غیرماندگار و ...)، و همچنین شبیه‌سازی انواع مکانیزم‌های انتقال حرارت (رسانایی، جابجایی آزاد، جابجایی اجباری، تابشی)، مدل‌سازی انواع واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای احتراقی، تحلیل جریان‌های دوفازی و چندفازی (مانند جوشش، میعان، کاویتاسیون و ...)، مدل‌سازی مسائل توربوماشین‌ها (پمپ، توربین، کمپرسور، فن)، مدل‌سازی جریان درون محیط‌های متخلخل و مواردی بی‌شماری از این دست را دارد. در این مدل، معادله‌های حاکم بر حرکت سیال با روش حجم محدود حل می‌گردد و اکثر حلگرها، کتابخانه‌ها، اشیاء و کدهای نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ++C توسعه داده شده‌اند. متن باز بودن و عدم نیاز به مجوز برای استفاده آن، از جمله ویژگی‌هایی است که این مدل را به ابزاری جذاب برای حل مسائل پیچیده در حوزه هیدرولیک محیط زیست تبدیل کرده است. نرم‌افزار اوپن فوم، از ارتباط خوبی با سایر نرم‌افزارهای پیش‌پردازش و پس‌پردازش برخوردار است، به عنوان مثال در این نرم‌افزار ابزار ایجاد هندسه<sup>۲</sup> به‌طور پیش‌فرض وجود دارد؛ اما امکان دریافت مش از نرم‌افزارهای دیگر تولید شبکه مانند Gambit و Netgen نیز پیش‌بینی شده است. در حوزه پس‌پردازش هم علاوه بر ParaView که به صورت پیش‌فرض و

1. OpenFOAM
2. BlockMesh

ریزشونده و درشت شونده استفاده شد. نحوه شبکه بندی هندسه مدل نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مسأله از شبکه ای با تعداد  $162,403$  المان استفاده شد که در نتیجه، تحلیل حساسیت بین شبکه هایی با تعداد مش های مختلف به دست آمد. منبع آلودگی مربع شکل با ابعاد  $1 \times 1$  سانتی متر می باشد. ابعاد مش در نقطه منبع به میزان کافی ریز شده و با نرخ  $1/1$  رشد داده شدند.

به منظور حل مسئله در نرم افزار اوپن فوم، ابتدا لازم است ثوابت و شرایط مرزی مسئله تعریف گردد و سپس نزدیک ترین حلگر برای حل مسئله مورد نظر از کتابخانه اوپن فوم انتخاب می گردد. چنانچه حلگری متناسب با مسئله مورد نظر یافت نشود، لازم است حلگری برای هدف مورد نظر توسعه داده شود. در بین حلگرهای متعددی که در کتابخانه اوپن فوم وجود دارد، نزدیک ترین حلگر به مسئله حاضر، حلگرهای انتقال حرارت می باشد که در کنار حل معادلات حاکم بر حرکت سیال، اقدام به حل معادلات انتقال انرژی نیز می نماید. در این حلگر نسبت به حلگرهای سیالاتی، دما به عنوان معرف حرارت اضافه شده است.

پلوم مونوکسید کربن مورد مطالعه در این تحقیق دارای مومنم خروجی پایین و شناوری مثبت بود که به دلیل سبکی خود، به سمت بالا به حرکت درمی آید؛ به این ترتیب جریان در امتداد حرکت به سمت بالا سریعاً آشفته شده و با سیال محیط اختلاط می یابد. سیال تراکم ناپذیر و لزج فرض شده و تأثیر شناوری آلاینده در معادلات حرکت با کمک تقریب بوسینسک<sup>۱</sup> ساده سازی شده است. مدل سازی جریان در حالت پایدار مورد نظر بوده و تحت این شرایط حلگر buoyant Boussinesq Simple Foam به عنوان حلگر مناسب انتخاب شده است. حل یک مسئله تراکم پذیر سبب افزایش هزینه های محاسباتی شده و زمان محاسبات را به شدت بالا خواهد برد، در حالی که حل پایدار در شرایط تراکم ناپذیر با ساده سازی معادلات حاکم، هزینه محاسباتی به مراتب کمتری تحمیل خواهد نمود. حلگر فوق از تخمین بوسینسک برای در نظر گرفتن اثر شناوری و از الگوریتم SIMPLE برای حل معادله های



شکل ۱. سمت راست هندسه مورد مطالعه و شکل سمت چپ هندسه مدل سازی شده

در این تحقیق از مش غیرساختار یافته برای شبکه بندی هندسه مدل استفاده شد و برای نواحی که جریان از اهمیت بیشتری برخوردار بود مانند نقطه ورودی پلوم آلودگی و خروجی آن، از مش های

1. Boussinesq approximation



### مدل سازی آشفتهگی

در این تحقیق از سه مدل آشفتهگی  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\omega$  و  $k-\Omega$  SST برای مدل سازی اثرات آشفتهگی استفاده شد. در ادامه با تشریح این مدل ها، نتایج حاصل از هر یک با مقایسه آن با مشاهدات آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد.

#### - مدل استاندارد $k-\varepsilon$

مدل استاندارد  $k-\varepsilon$ ، معروف ترین مدل از میان مدل های دو معادله ای در حل مسائل آشفتهگی است. فهم آن آسان و استفاده آن در برنامه نویسی و مدل متن باز اوپن فوم ساده است. در این مدل،  $k$  انرژی جنبشی جریان و  $\varepsilon$  نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته می باشد.

معادله ۱۱:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$+ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

معادله ۱۲:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]$$

$$+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

در معادلات بالا  $G_k$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی متلاطم به دلیل سرعت متوسط،  $G_b$  نشان دهنده تولید انرژی جنبشی متلاطم ناشی از شناوری،  $Y_M$  نشان دهنده سهم متغیر انبساط در جریان قابل تراکم و متلاطم به مقدار اتلاف کل و  $\sigma_k = 1/0$  و  $\sigma_\varepsilon = 1/3$  نشان دهنده اعداد پرانتل آشفته برای  $k$  و  $\varepsilon$  می باشد.  $C_{1\varepsilon}$ ،  $C_{2\varepsilon}$  و  $C_{3\varepsilon}$  ثابت های معادله و  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  اصطلاحات تعریف شده توسط کاربر می باشد. با محاسبه  $k$  و  $\varepsilon$  از روابط فوق، ویسکوزیته آشفتهگی  $\mu_t$  با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد.

معادله ۱۳:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega}$$

که در آن  $C_\mu$  عددی ثابت است.

جفت شده فشار - مومنتم استفاده می کند. ترم اضافه شده به معادلات مومنتوم در تقریب بوزینسک، اثرات تفاوت چگالی در ایجاد شناوری در راستای قائم را در نظر می گیرد. در تقریب بوزینسک، اختلاف دما در سیستم محدود بوده و باید از رابطه  $\beta(T - T_0) \ll 1$  پیروی کند. با توجه به اینکه حلگر مورد نظر قادر به حل معادلات غلظت نمی باشد، برای برآورد تغییرات غلظت در شرایط مسأله لازم است معادله بقای غلظت یا معادله انتقال و انتشار غلظت به معادلات حاکم اضافه شود. برای این منظور با اضافه نمودن معادله بقای غلظت در حالت ماندگار (معادله ۱۱)، حلگری جدید تحت عنوان mass Buoyant Boussinesq Simple Foam توسعه داده شد. حلگر توسعه یافته به این ترتیب قادر به حل معادلات انتقال حرارت و همچنین غلظت می باشد. در این حالت حلگر مورد نظر قادر به مدل سازی تأثیرات اختلاف دما در منبع آلودگی با سیال محیط و همچنین پخش غلظت انواع آلاینده ها در محیط است. در این مطالعه با فرض دمای یکسان منبع تخلیه و سیال محیط، تنها نحوه پخش غلظت آلاینده در محیط مورد ارزیابی قرار گرفت.

معادله ۱۰:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \alpha_{eff} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S$$

در این رابطه  $S$  منبع یا زوال آلودگی و  $C$  غلظت گونه سیال برحسب جرم مونوکسید کربن بر جرم هواست. این معادله در حالت بدون وجود واکنش شیمیایی مورد استفاده قرار گرفته و در صورتی که سیال شامل اجزای شیمیایی مختلف باشد یا واکنش شیمیایی وجود داشته باشد، از قوانین بقای دیگری نیز باید استفاده کرد.

در مطالعه حاضر دمای محیط به صورت ثابت و برابر با ۲۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته شد. عدد پرانتل آشفته برابر با ۰/۹ و هوا مقدار عدد اشمیت برابر ۰/۸۴ (Sc=۰/۸۴) و میزان ضریب دیفیوژن مولکولی برابر با ۰/۰۰۰۰۱۹ در نظر گرفته شد. فشار نیز با شروع حل مسئله توسط نرم افزار اوپن فوم محاسبه گردید.

### – مدل استاندارد k-omega

این مدل، یکی از پرکاربردترین مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای است. این مدل توانایی بالایی در انتگرال‌گیری از معادلات نزدیک دیواره داشته و نسبت به مدل k-epsilon در شبیه‌سازی جریان‌های دارای کاهش سرعت و جدایش ناشی از گرادیان فشار معکوس، بهتر عمل می‌کند، لذا کاربرد بیشتری در مدل‌سازی مسائلی با حضور شرایط مرز ثابت دارد. یکی از مزیت‌های این روش، استفاده از آن در محاسبات نزدیک دیواره برای رینولدزهای پایین است، اما محدودیت اصلی این روش، حساسیت زیاد آن به شرایط جریان آزاد است. در مدل k-omega ارتباط بین مقیاس آشفتگی طولی و سرعتی یعنی  $\delta_t$  و  $u_t$  با  $k$  و فرکانس آشفتگی  $\omega$  توسط روابط زیر بیان می‌شوند:

$$\delta_t \propto \frac{\sqrt{k}}{\omega} \quad \text{معادله ۱۴:}$$

$$u_t \propto \sqrt{k} \quad \text{معادله ۱۵:}$$

### – مدل k-OmegaSST

این مدل که برگرفته از مدل k-omega است، جزء محبوب‌ترین مدل‌های توربولانسی محسوب شده و در شبیه‌سازی حالاتی با تأثیرات لایه مرزی، دارای کاربرد گسترده می‌باشد. از معایب این روش می‌توان به هزینه بالای محاسباتی نسبت به مدل توربولانسی k-epsilon اشاره کرد. همچنین این مدل در اعداد رینولدز بالا گاهی مشکل‌ساز است.

### یافته‌ها

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی رفتار پلوم آلودگی در محیط ساکن داخل کارگاه در حالت ماندگار برای سه مدل آشفتگی متفاوت آورده شده است. در نمودار ۱ (الف)، (ب) و (ج)، رفتار عمومی پلوم آلودگی از منظر تغییرات سرعت و غلظت جریان برای حالت ماندگار از ورود آلودگی به ساختمان آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با خروج از منبع به دلیل شناوری مثبت، جریان به سمت بالا رفته و تحت تأثیر آشفتگی ایجاد شده ناشی از تنش برشی در مجاورت مرزها، هوای پیرامون را به داخل کشیده و ترقیق

می‌یابد. در این حالت به تدریج عرض جریان افزایش یافته و غلظت مونوکسیدکربن در امتداد مسیر کاهش می‌یابد. میزان اختلاط و رقیق‌سازی آلودگی در محیط مستقیماً تحت تأثیر سرعت و چگالی جریان بوده و هرچه سرعت بیشتر و اختلاف چگالی بزرگ‌تر شود، القای آشفتگی بیشتر بوده و در نتیجه اختلاط و ترقیق بهتری اتفاق خواهد افتاد.

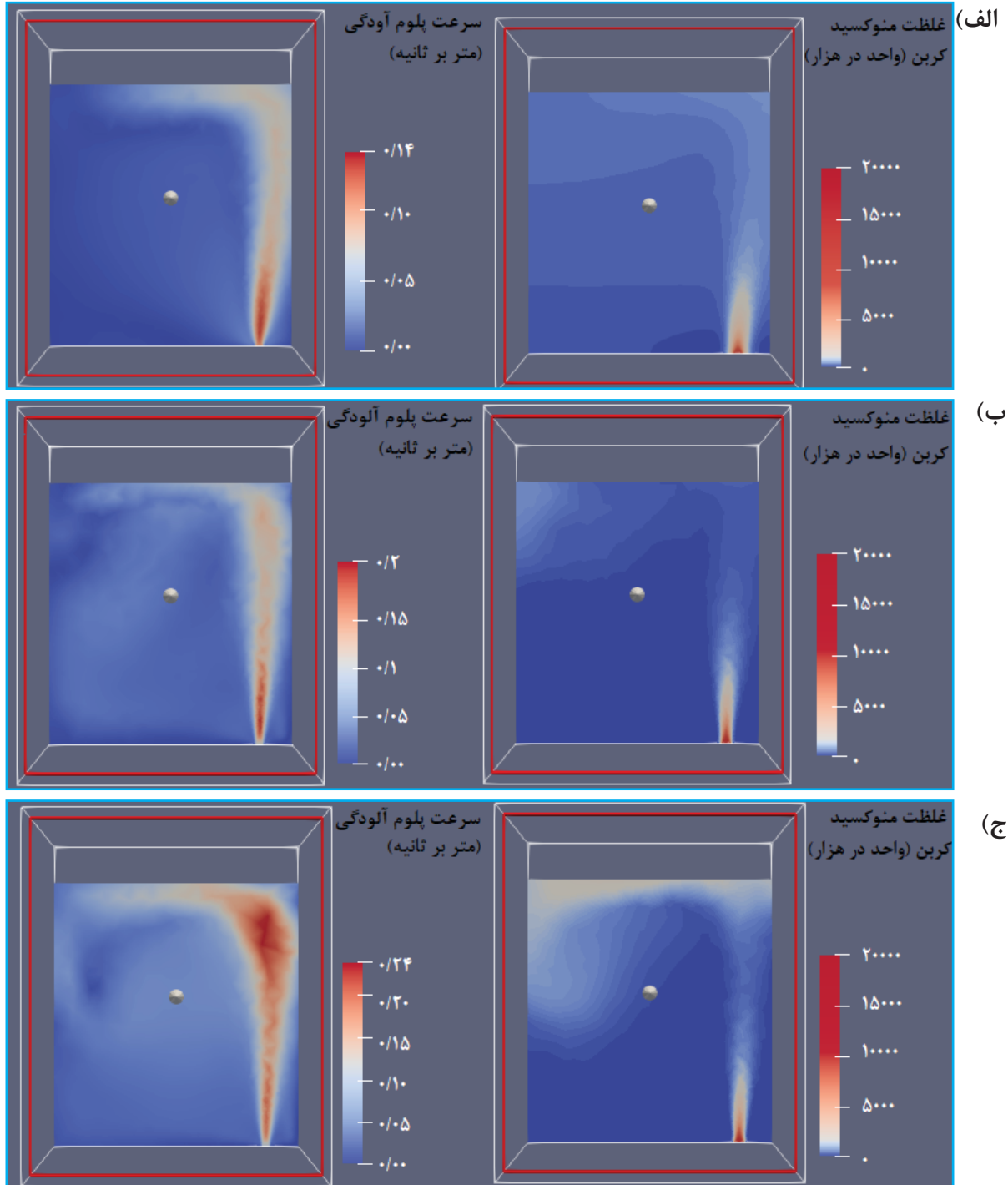
در تخلیه پلوم آلودگی، سیال پس از خروج از منبع آلاینده، تحت تأثیر دو ناحیه مجزا در محیط پخش شده و اختلاط می‌یابد. ناحیه میدان نزدیک که در آن مشخصات جریان تنها تحت تأثیر موتتم و شناوری جریان خروجی تغییر می‌کند و ناحیه میدان دور که تأثیر مرزهای محدوده‌کننده جریان باعث توقف و انحراف مسیر حرکت جریان می‌شود. در این حالت جریان با از دست دادن موتتم اولیه و القاء شده ناشی از شناوری، به سمت بالا حرکت کرده و در مجاورت سقف سوله آرامش می‌یابد و در نهایت از پنجره سقفی آن خارج می‌شود. در محدوده میدان نزدیک رفتار جریان ابتدا تحت تأثیر شکل منبع یا پروفیل اولیه سرعت (یا غلظت) خروجی خواهد بود. در این ناحیه که تحت عنوان ناحیه توسعه جریان (ZFE)<sup>۱</sup> شناخته می‌شود، پروفیل عرضی مشخصی برای سرعت و غلظت وجود ندارد و تأثیرات ناپایداری در لبه مرزها هنوز به مرکز جریان نرسیده است. با توسعه جریان، پروفیل عرضی سرعت و غلظت به تدریج یک شکل مشخص زنگوله‌ای به خود خواهد گرفت. این پروفیل میانگین زمانی نوسانات غلظت یا سرعت جریان در عرض پلوم بوده و به خوبی بر توزیع گوسی<sup>۲</sup> برازش دارد. تابع توزیع گوسی تغییرات غلظت در عرض جریان به صورت زیر است:

$$C(xy) = C_{max} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{b_p^2}\right) \quad \text{معادله ۱۶:}$$

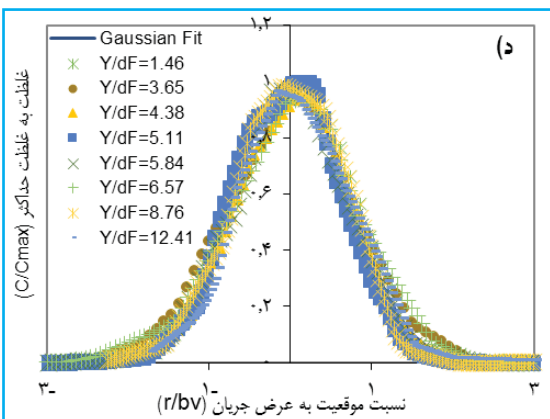
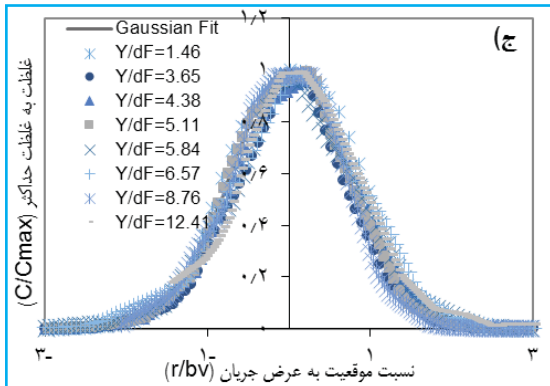
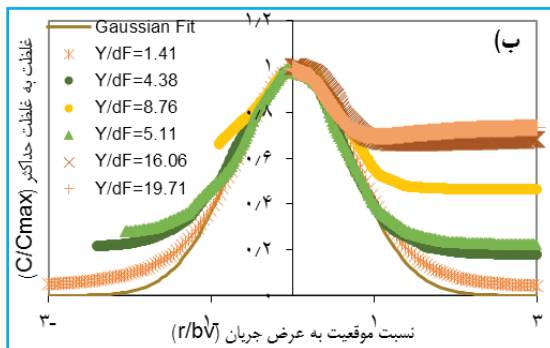
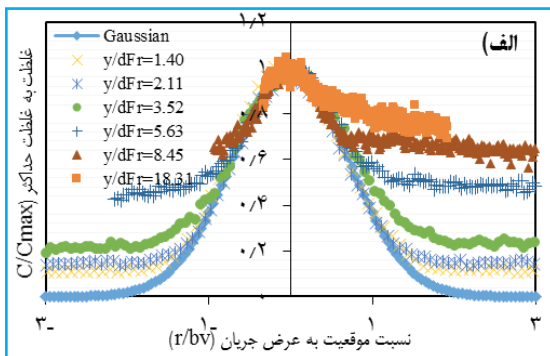
این پروفیل‌های گوسی خود همسان بوده؛ به این معنی که در نقاط مختلف علی‌رغم افزایش عرض و بازشدگی، جریان دارای شکل و الگویی مشابه بوده و تا انتها حالت زنگوله‌ای خود را حفظ می‌نماید. چنانچه مشابه نمودار ۱، محورهای پروفیل‌های عرضی

1. Near Field Zone  
2. Gussian fit

نرمال گردد، پروفیل‌هایی با فواصل مختلف به‌خوبی بر روی هم قرار خواهند گرفت. در این شکل  $C_{MAX}$  حداکثر غلظت در برش



شکل ۲. نمایی از غلظت پلوم (سمت راست) و سرعت جریان (سمت چپ) در حل الف) مدل آشفتگی k-epsilon استاندارد، ب) مدل آشفتگی k-omega، ج) مدل آشفتگی k-omega SST



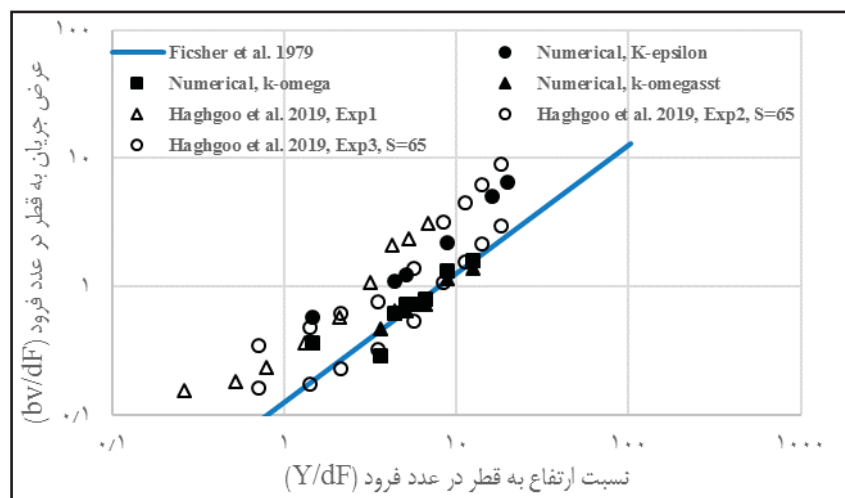
نمودار ۱. نمودارهای خود همسان پروفیل غلظت برای مقاطع در فواصل مختلف از منبع الف) مدل آزمایشگاهی ب) مدل k-epsilon، ج) مدل k-omega، د) مدل k-OmegaSST

برای ترسیم این اشکال، با برداشت پروفیل غلظت عمود بر خط مرکزی جریان در نقاط مختلف، مقدار غلظت  $C$  در هر نقطه، با تقسیم بر بیشینه غلظت  $C_{MAX}$ ، به صورت  $C/C_{MAX}$  نرمال و بر روی محور  $Y$ ها ترسیم گردید. در محور  $X$ ها نیز فاصله شعاعی (فاصله طولی روی خط نسبت به مبدأ نیمرخ) که به صورت  $r$  تعریف شده، با تقسیم بر مقدار عرض جریان  $(b_v)$  به شکل  $r/b_v$  نرمال گردید.  $b_v$  فاصله شعاع روی هر نیمرخ نسبت به مرکز جریان است که در آن، رابطه  $C/C_{MAX} = 1/e$  میان غلظت‌ها برقرار باشد. در این رابطه  $e$  عدد اویلر (ثابت نپر) و برابر با  $2/718$  است؛ به این ترتیب  $b_v$  موقعیت نقطه‌ای است که غلظت جریان در آن  $1/e$  یا  $0.37$  مقدار غلظت ماکزیمم در آن مقطع است. بر اساس رابطه برازش گوسی با تقسیم فاصله هر نقطه  $(r)$  بر عرض منحنی برازش  $(b_v)$  مقدار کمیت  $r/b_v$  در محدوده  $\pm 3$  تغییر خواهد کرد؛ به این ترتیب در اشکال زیر پروفیل‌های خود همسان غلظت برای فواصل مختلف از منبع تخلیه  $(Y/DF)$  برای مدل آزمایشگاهی و نتایج مدل‌های مختلف آشفستگی در شبیه‌سازی عددی ترسیم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، همه مقاطع از الگویی مشابه و خود همسان پیروی می‌کنند. به‌طور کلی تقارن پروفیل‌ها در طول مسیر حفظ شده و تا حدی انحراف به سمت دیواره در آن مشاهده می‌گردد. در نمودارهای خود همسان با فاصله از منبع تخلیه به دلیل افزایش غلظت زمینه‌ای آلاینده در محیط، غلظت از مقدار زمینه‌ای نسبتاً بالایی شروع و در مرکز پلوم به حداکثر خود می‌رسد. این موضوع با توجه به اشکال بالا و مدل‌سازی جریان در حالت ماندگار بیانگر شکل‌گیری یک غلظت زمینه‌ای از آلاینده در فاصله از منبع تخلیه در فضای تنفسی افراد شاغل در کارگاه است. همچنین محدود بودن پلوم از یک سمت به دیوار به تدریج سبب انقطاع و ویرانی تقارن نیمرخ‌ها می‌گردد. در نمودارهای زیر مشاهده می‌شود مدل‌های آشفستگی مختلف، الگوی حرکت و میزان پخشیدگی جریان را تا حدی متفاوت از یکدیگر پیش‌بینی می‌کنند.

و آزمایشگاهی انجام گرفته بر روی جت‌های آشفته در محیط‌های ساکن که توسط فیشر و همکاران گزارش شده است (۱۲) و نیز نتایج مطالعات آزمایشگاهی حقگو و همکاران مقایسه شد. در منابع مختلف، تعاریف متفاوتی برای عرض جریان ارائه شده است. در برخی موارد، موقعیت نقطه‌ای که در آن غلظت  $10\%$  ماکزیمم غلظت پروفیل جریان است، به‌عنوان عرض جریان معرفی شده است، این در حالی است که لی و چو، موقعیت نقطه‌ای با  $25\%$  غلظت ماکزیمم را به‌عنوان عرض جریان پیشنهاد نمودند (۱۳). در این نقطه، مرز جریان به‌صورت بصری قابل تشخیص است. این محدوده در واقع فاصله شعاعی تا نقطه‌ای است که در آن تناوب آشفستگی برابر  $0/5$  است. ژیرکا، فاصله شعاعی نقطه‌ای نسبت به مرکز که در آن غلظت  $C_{max} \times 0/37$  باشد را به‌عنوان عرض یا بازشدگی پلوم جریان معرفی نمود (۱۴). در نمودار ۲، مقدار عرض یا بازشدگی معادل  $37\%$  غلظت بیشینه برای نتایج این تحقیق در مقایسه با مطالعات پیشین مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس این نمودار، همه مدل‌ها از الگوی عمومی گزارش شده برای جت‌های آزاد پیروی می‌کنند، اما میزان عرض جریان در مدل k-epsilon تا حدی بیشتر از سایر مدل‌ها برآورد شده است.

## باز شدگی جریان

همانطور که اشاره شد، پلوم آلودگی در ابتدا در اثر سرعت و شناوری اولیه خود در محیط به حرکت درمی‌آید. ناپایداری‌های شکل گرفته در مجاورت مرزهای پلوم تحت عنوان ناپایداری کلین-هلمهولتز که بر اثر اختلاف سرعت و شکل‌گیری تنش برشی در مجاورت مرزها شکل می‌گیرد، باعث القای آشفستگی و اغتشاش در بدنه جریان می‌شود؛ به این ترتیب سیال از بیرون جت به داخل آن کشیده شده و با افزایش حجم پلوم و در نتیجه عرض جریان، میزان غلظت در امتداد خط مرکزی آن به‌تدریج کاهش می‌یابد. جریان خروجی در نهایت با ادامه حرکت عمودی خود به سقف کارگاه برخورد کرده و باقی‌مانده مومنت آن از بین رفته و مستهلک می‌شود که این موضوع به پخشیدگی بیشتر آلودگی در مجاورت سقف ساختمان منجر خواهد شد. نحوه باز شدگی جریان و افزایش عرض مشخصه ذاتی از جریان بوده که با تغییرات عدد فرود جریان برای آزمایشات مختلف تغییر چندانی نمی‌کند. در نمودار زیر نحوه تغییرات عرض جریان (عرض معادل  $C_{max} \times 0/37$ ) برای نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مختلف ترسیم شده است. به‌منظور صحت‌سنجی، نتایج به‌دست آمده با میانگین مقدار به‌دست آمده از مطالعات تحلیلی

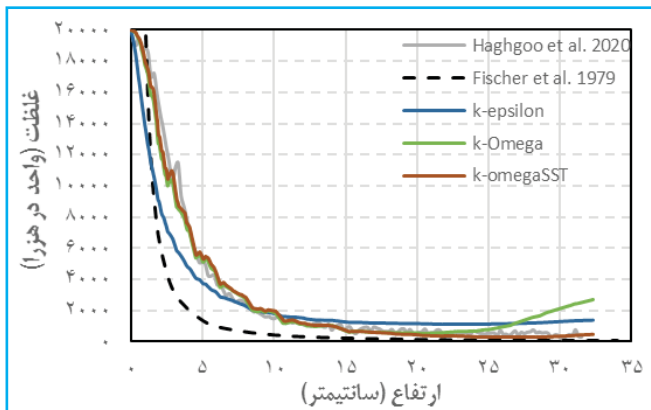


نمودار ۲. نمودار تغییرات پخشیدگی عرض جریان نسبت به ارتفاع در امتداد مسیر پلوم برای مدل‌های توربولانسی k-omega و k-OmegaSST

## بحث

با توجه به محصور بودن فضای ساختمان، برآورد میزان و نحوه پخشیدگی آلودگی در فضاهای داخلی از اهمیت خاصی برخوردار است. پلوم گاز مونوکسیدکربن که از فرآیند احتراق ناقص تولید می‌شود، یکی از آلاینده‌های متداول و البته بسیار خطرناک در ساختمان‌های مسکونی و کارگاه‌های صنعتی است. به دلیل کم بودن جرم مولکولی و در نتیجه کمتر بودن چگالی آن نسبت به محیط، پلوم مونوکسید کربن دارای شناوری مثبت بوده و با ورود به فضای ساختمان به سمت بالا حرکت می‌کند. افزایش دمای منبع به دلیل انبساط مولکولی ذرات باعث کاهش چگالی و سبکی گازها شده و باعث حرکت آنها به سمت بالا می‌گردد. در مدل حاضر، منبع آلودگی هم‌دما با محیط و دارای غلظت مونوکسید کربن به میزان ppm ۲۰۰۰۰ است که به دلیل جرم مولکولی کمتر CO باعث سبکی جریان (با چگالی ۱/۱۴ کیلوگرم بر متر مکعب) نسبت به هوای محیط (با چگالی ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) می‌شود. در حالت ماندگار، جریان خروجی از منبع نقطه‌ای با رسیدن به سقف در مجاورت آن پخش شده و به تدریج یک غلظت زمینه‌ای از آلاینده در فضای ساختمان ایجاد می‌نماید. در این حالت، بخشی از آلودگی به تدریج از پنجره سقفی ساختمان خارج شده و حالتی پایدار در ارتباط با لایه‌بندی غلظت آلاینده‌ها در فضای تنفسی شاغلین در کارگاه ایجاد می‌گردد. به‌طور معمول در کارگاه‌ها یا سوله‌های صنعتی، از بازشوها دیواری و پنجره‌های سقفی پشت به باد جهت تهویه طبیعی ساختمان استفاده می‌شود. ارزیابی میزان کارایی این بازشوها به شدت و جهت باد در منطقه و شکل و موقعیت بازشوها نسبت به باد بستگی دارد. در شرایط بسته بودن بازشوها و عدم وجود باد، این مومنتم اولیه و شناوری جریان است که امکان حرکت به سمت بالا و تهویه طبیعی آلودگی از ساختمان را فراهم می‌سازد. در این حالت با از کار افتادن عملکرد پنجره سقفی، جریان آلودگی به‌خوبی از داخل سوله خارج نشده و عدم تهویه ساختمان، لایه‌بندی آلودگی و افزایش غلظت زمینه‌ای آلاینده در فضای تنفسی انسان را به‌دنبال خواهد داشت. میزان پخشیدگی آلودگی به این ترتیب متأثر از ابعاد ساختمان،

ابعاد بازشوها و درجه سقفی و شار مومنتم و شناوری جریان خروجی میباشد. در این حالت برای جریانهای سبک‌تر، لایه آلودگی نزدیک‌تر به سقف و برای جریانات با شناوری کمتر، لایه آلودگی ضخیم‌تر و نزدیک‌تر به کف ساختمان خواهد بود. با تجمع آلودگی در شرایط عدم تهویه مناسب فضای داخلی کارگاه، فعالیت کارگران در محیط و تنفس مونوکسیدکربن، در نهایت می‌تواند به بی‌حالی و سستی افراد ختم شده و صدمات جبران‌ناپذیری به سلامت افراد وارد کند. در مدل حاضر غلظت ppm ۲۰,۰۰۰ مونوکسیدکربن در منبع با حرکت به سمت سقف به تدریج به دلیل اختلاط با هوای محیط کاهش یافته و به حدود ppm ۱۳۵۰ در نتیجه اجرای مدل k-epsilon و ppm ۲۷۰۰ در مدل k-omega و ۴۵۰ در مدل k-OmegaSST می‌رسد (نمودار ۳). این در حالی است که در مشاهدات آزمایشگاهی، میزان غلظت در مجاور سطح برای حالت مشابه در حدود ppm ۴۲۵ برآورد شده است؛ به بیان دیگر ترقیق یا کاهش غلظت آلودگی در محیط تا میزان ۱۵ برابر در مدل k-epsilon، ۷/۵ برابر در مدل k-omega و ۴۴ برابر در مدل k-omegaSST برآورد شده است، درحالی که در مشاهدات آزمایشگاهی ترقیقی تا میزان ۴۷ برابر مشاهده شده است. در این رابطه ترقیق به نسبت غلظت آلاینده در منبع به غلظت مشاهده شده از آن در مجاورت سقف ( $S = \frac{C_0}{C}$ ) اطلاق می‌گردد.



نمودار ۳. نمودار تغییرات غلظت در امتداد خط مرکزی جریان برای مدل‌های توربولانسی k-epsilon، k-omega و k-OmegaSST و مقایسه با کار آزمایشگاهی حقهو و همکاران

جهت حفظ سلامت کارگران گریزناپذیر خواهد بود (۱۸).

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه که نتایج شبیه‌سازی عددی رفتار پلوم مونوکسیدکربن در فضای محصور یک کارگاه صنعتی آورده شد، نتایج نشان داد که ورود آلودگی باعث شکل‌گیری یک لایه‌بندی پایدار از گاز مونوکسیدکربن در داخل کارگاه می‌شود که در آن غلظت آلاینده به تدریج از کف ساختمان تا سقف افزایش می‌یابد. عدم وجود باد و بازشوهای جانبی، باعث شکل‌گیری بدترین شرایط برای تهویه طبیعی آلودگی از ساختمان شده؛ تا حدی که هوای داخل نمی‌تواند استانداردهای کیفی مورد نیاز در ارتفاع تنفسی افراد را برآورده سازد. تهویه طبیعی ساختمان بالاخص در کارگاه‌های صنعتی با منابع دائمی آلودگی و هزینه بالای نصب و بهره‌برداری از تأسیسات مکانیکی، امری ضروری محسوب می‌گردد و این موضوع می‌تواند با مدل‌سازی سناریوهای مختلف با استفاده از حلگر توسعه داده شده در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گیرد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین، هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره ۳۹۰۳۵/۱۴۰۰ / BNUT تشکر و قدردانی می‌شود.

### References

- Ghiasuddin M. Air pollution. Sources, impacts and control, Second Edition, Tehran university publication, Tehran. 2018. (Persian)
- Levy RJ. Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: a public health concern. *Neurotoxicology and teratology*. 2015. 49: 31-40.
- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (ASHRAE.org), ASHRAE Standards Strategic Plan.

ارتفاع تنفسی انسان به‌طور متوسط کمتر از قد میانگین افراد و در حدود ۱۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در این تحقیق، مقیاس مدل عددی و آزمایشگاهی نسبت به نمونه واقعی یک کارگاه صنعتی ۱:۳۰ در نظر گرفته شده است، میزان غلظت در ارتفاع متناظر با ۱۶۰ سانتی‌متری در مدل، که ارتفاعی در حدود ۵/۳ سانتی‌متر است، استخراج شده و با استانداردهای موجود مقایسه گردید. میزان غلظت در این ارتفاع در مدل k-epsilon برابر با ۷۰۰ ppm و در دو مدل توربولانسی دیگر کمتر از ۱۰۰ ppm برآورد شده است. این در حالی است که در آزمایشات حقیقی و همکاران، برای شرایط مشابه غلظتی برابر با ۱۵۰۰ ppm مشاهده شده است؛ به این معنی که در فضای بسته کارگاه و در شرایط عدم وجود باد، ناشی از پخشیدگی و اختلاط طبیعی میزان غلظت از ۲۰,۰۰۰ ppm در منبع آلودگی تا میزان ۱۵۰۰ ppm در فضای تنفسی انسان کاهش یافته است. میزان سمیت مونوکسید در فضای تنفسی انسان وابسته به غلظت و مدت زمان تماس با آن است. مطالعات نشان داده‌اند که اگر انسان به مدت ۱ ساعت در معرض غلظت ۳۰ ppm از مونوکسیدکربن و یا به مدت ۸ ساعت در تماس با غلظت ۹ ppm از این آلاینده باشد، غلظت کربوکسی هموگلوبین (CoHb) خون فرد به ۱/۳٪ می‌رسد که سردرد و کاهش عملکرد مغزی را به دنبال خواهد داشت (۱۵). همچنین بر اساس استانداردهای موجود، غلظت مونوکسیدکربن در هوای تنفسی به میزان ۵۰ ppm در مدت تماس ۸ ساعت اختلالات عصبی و غلظت ۵۰۰۰ ppm بعد از ۵ دقیقه تماس، اثرات مرگ‌بار و کشنده برای انسان به دنبال خواهد داشت (۱). این موضوع به‌خودی خود لزوم استفاده از سیستم‌های تهویه مکانیکی یا ارتقای بازشوها در این سوله صنعتی جهت تهویه بهتر آلودگی و کاهش غلظت مونوکسید کربن در فضای کاری و تنفسی افراد را نشان می‌دهد. استفاده از پنجره‌های دیواری و یا افزایش میزان بازشوهای سقفی در شرایط سکون هوا نیز می‌تواند به‌عنوان راهکارهای عملی جهت ارتقای تهویه طبیعی ساختمان مورد مطالعه قرار گیرد. در صورت عدم کفایت روش‌های طبیعی، استفاده از تهویه مکانیکی

4. Lam J.C., Chan A.L.S. CFD analysis and energy simulation of a gymnasium, *Building and Environment*. 2001.
5. Yu H., Liao C.M., Liang H.M. et al. Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: Non-isothermal condition, *Building and Environment*, 2007.
6. Zhang J.S., Frana K. A Numerical Simulation of the Indoor Air Flow, 2013.
7. Limane A., Fellouah H., Galani, N. Thermo-ventilation study by OpenFOAM of the airflow in a cavity with heated floor, *Building Simulation*. 2015
8. King M.F. Investigating the influence of neighbouring structures on natural Ventilation potential of a full-scale cubical building using time-dependent CFD, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017.
9. Limane A., Fellouah H., Galanis N. Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017
10. Haghgoo, A., Abessi, O., Rahmani Firoozjaee, A. Experimental study on the transport and distribution of Carbon Monoxide in indoor spaces. *Journal of Environmental Studies*, 2019, 45(4), 725-740. (Persian)
11. Haghgoo, A. Dispersion modeling of air pollution from indoor point sources. MSc Thesis, Babol Noshirvani University of Science and Technology, 2019. (Persian)
12. Fischer B., List E.J., Imberger J., Brooks N.H. *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York. 1979
13. Lee J., Chu H.W., Chu, V.H. *Turbulent jets and plumes: A Lagrangian approach*. Vol. 1. Springer Science & Business Media. 2003
14. Jirka G. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: single round jet. *J. Environ. Fluid Mech.* 2004, 4: 1e56.
15. Lende R. A temporary decrease in the ventilatory function of an urban population during an acute increase in air pollution. *Bulletin Europeen de physiopathologie respiratoire*. 1975. 11:31-43 in WHO series No.23.
16. Zhan J.S., Frana K. A Numerical Simulation of the Indoor Air Flow. 2013
17. CFX-solver. A. N. S. Y. S. Theory guide. Release II. 2006.
18. Sakiyama NRM., Mazzaferro L., Carlo J.C., Bejat T., Garrecht H. 2021. Dataset of the EnergyPlus model used in the assessment of natural ventilation potential through building simulation. *Data in brief*, 34, 106753.