تحلیل میدان جریان و پراکندگی ذرات آلاینده در ساختمان تحت تهویه طبیعی

امیر حکمیان*
کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندس مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

ارجاع به مقاله:
امیر حکمیان، تحلیل میدان جریان و پراکندگی ذرات آلاینده در ساختمان تحت تهویه طبیعی، مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۴۰۳؛ ۹ (۱): ۷۷-۸۲.

چکیده

در پژوهش حاضر، ابتدا به بیان مقدمه‌ای بر تهویه طبیعی و پراکندگی ذرات معلق و سپس به معرفی تحقیقات انجام شده در زمینه پراکندگی آلاینده‌ها و تهویه طبیعی پرداخته شده است. در ادامه، روش تحقیق، معادلات مدل‌های زیرشبکه‌های استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها، لزجت گردابه‌ای موضعی متناسب با دیواره WALE اسماگورینسکی-لیلی استاندارد SSLM و اسماگورینسکی-لیلی دینامیکیDSLM، دامنه محاسباتی و سایر شرایط مورد نیاز برای شبیه-سازی به تفصیل ارائه شده است. به منظور اطمینان از داده‌های نتایج شبیه‌سازی حاضر، صحت‌سنجی و مقایسه آن‌ها با نتایج تجربی موجود انجام شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل زیرشبکه WALE برای شبیه‌سازی پراکندگی ذرات در ساختمان تحت تهویه طبیعی نسبت به دو زیر شبکه دیگر مناسب‌تر است و مدل زیرشبکه SSLM کمترین میزان غلظت ذرات جامد معلق را در داخل ساختمان پیش‌بینی می‌کند. نتایج همچنین مشخص می‌کند که در نزدیکی ورودی ساختمان، شارهای جابه‌جایی و دیفیوژن آشفته در فرایند انتقال آلاینده نقش موثری دارند و با حرکت در طول ساختمان تاثیر شار جابه‌جایی بیشتر از شار دیفیوژن می‌شود.

کلمات کلیدی
میدان جریان، پراکندگی ذرات آلاینده، مدل تهویه طبیعی ساختمان

۱- مقدمه

آلودگی هوا می‌تواند بر سلامت انسان اثر بگذارد. اگر آلاینده‌ها از طریق مجراهای موجود به داخل ساختمان نفوذ کنند و یا در داخل ساختمان توسط افراد تولید شوند، باعث می‌شود که کیفیت و سطح آسایش ساکنین کاهش یابد. کیفیت هوای داخل ساختمان به سیستم‌های تهویه مطبوع نیز وابسته است. اگر این سیستم‌ها طراحی مناسبی نداشته باشند، می‌تواند کیفیت هوا را کاهش دهد. برای مثال با برگشت جریان خروجی به‌عنوان هوای تازه و یا استفاده از هوای خارجی تحت عنوان هوای تازه به داخل ساختمان سبب افت کیفیت هوا می‌گردد.

عملکرد اساسی تهویه در یک ساختمان، حفظ یک محیط سالم و راحت با مصرف انرژی قابل قبول است. دو نگرانی عمده در طراحی سیستم‌های تهویه وجود دارد [۱]:

- کیفیت هوا در محیط داخلی و راحتی حرارتی
- مصرف انرژی و کارایی

به دلیل این‌که مردم بیشتر وقت خود را در درون محیط مسقف می‌گذرانند، اکثر مواجهه آن‌ها با آلاینده‌های محیطی به‌وسیله تنفس

Analysis of flow field and particle pollutant dispersion in a naturally cross-ventilated model building

Amir Hakamian*
M.Sc., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

***Corresponding author's email address:**
hakamian.amir@gmail.com

How to cite this article:
Amir Hakamian, Analysis of flow field and particle pollutant dispersion in a naturally cross-ventilated model building, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):77-82.

Abstract

This study, firstly, gives a summary about natural ventilation and particle dispersion, and, then, presents the research reported so far in these areas. As well as these, the research methodology, the sub-grid scale model equations used in the simulation, namely, Wall-Adapting Local Eddy-viscosity (WALE), Standard Smagorinsky-Lilly Model (SSLM) and Dynamic Smagorinsky-Lilly Model (DSLM), computational domain and other requisite conditions for the simulation have been illustrated. In order to ensure of the validity of the present results, direct comparisons with available experimental results have been made. These results show that the sub-grid scale WALE model is more accurate than the other models in the simulation of the particle dispersion in a model building with natural ventilation, and SSLM sub-grid scale model estimates the least particle concentration in the building. In addition, these results illustrate that the convective flux and turbulent diffusion flux have the key role in the pollutant transportation process around the entrance of model building. Also, the influence of convective flux is more than that of diffusion flux as one moves along the length of the model building.

Keywords
Flow field, particle pollutant dispersion, naturally cross-ventilated model building

JECM
9 (1) , 2024
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی

هوا در محیط داخلی انجام می‌شود [۲]. کیفیت هوا در محیط داخلی بسیار مهم و مورد توجه است؛ زیرا تأثیرات قابل توجهی بر سلامت ساکنان دارد. حضور ذرات معلق باعث ناراحتی چشم، تحریک سیستم تنفسی و حتی بیماری می‌شود. علاوه بر این، یک بی‌ثباتی در محیط داخلی می‌تواند بهره‌وری کارکنان را کاهش دهد [۱]. در جامعه مدرن مصرف انرژی در ساختمان‌ها افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود این روند می‌تواند افزایش یابد. در کشورهای توسعه یافته تخمین زده می‌شود که ۳۰ تا ۴۰ درصد انرژی در ساختمان‌ها مصرف می‌شود و بین ۱۰ تا ۶۰ درصد از این موارد برای تهویه هوا استفاده می‌شود [۳].

سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع HVAC به‌عنوان معمول ترین راه حل برای فراهم آوردن هوای داخلی مطلوب مطرح می‌باشد که بررسی‌ها نشان داده‌اند، استفاده از آن‌ها نتوانسته است لزوما یک محیط داخلی راحت و سالم را فراهم کند. مطالعات بسیاری نقش تهویه مکانیکی را در بروز مشکلات کیفیت هوای داخل اثبات کرده اند [۴]. شواهد نشان می‌دهد این سیستم‌ها می‌توانند عامل ایجاد آلودگی باشند [۵]. تهویه طبیعی نه‌تنها به کاهش مصرف انرژی توسط سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها کمک می‌کند بلکه می‌تواند کیفیت هوای داخل خانه را بهبود بخشد و سطح بالایی از راحتی را فراهم کند [۴].

۱-۱- تهویه طبیعی

هدف اصلی تهویه این است که هوای آلوده به گرمای بیش از حد کربن دی اکسید، سموم و سایر مواد ناخواسته را حذف کند و هوا را در دما و رطوبت مطلوب قرار دهد. هوای تازه با درجه حرارت و رطوبت مناسب برای راحتی و سلامت ساکنان در ساختمان ضروری است [۶] چرا که آلاینده‌های داخلی، ازهر دو نوع گازی و ذرات معلق می‌تواند موجب بیماری در انسان شود. تهویه طبیعی فراهم آوردن هوای تازه در ساختمان از طریق جریان هوای خارج ساختمان، بدون استفاده از هرگونه تجهیزات مکانیکی است. تهویه طبیعی اساسا جریان هوا بین داخل و خارج از ساختمان است. این جریان از طریق منافذ و به‌طور کلی از طریق پنجره صورت می‌گیرد.

مزیت اصلی سیستم‌های تهویه مکانیکی قابلیت کنترل‌پذیری در نرخ تعویض هوا و وابسته نبودن به کیفیت هوای خارج است، در عین حال سیستم‌های تهویه مکانیکی برای نصب و نگهداری پرهزینه است و محدودیت فضایی دارند. در مقابل در تهویه طبیعی قابلیت کنترل کمتری نسبت به تهویه مکانیکی وجود دارد اما سیستم طراحی شده، نه‌تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مقایسه با سیستم‌های تهویه مکانیکی می‌شود، بلکه قادر به ایجاد محیطی راحت و سالم است [۷]. تهویه طبیعی ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین راه برای تهویه هوای تازه و دست‌یابی به آسایش حرارتی است و یک ابزار مؤثر برای رقیق کردن و حذف آلاینده‌های داخلی ناشی از منابع داخلی است. سپس کیفیت هوا در محیط داخلی را بهبود می‌بخشد [۶]، مشروط بر این‌که کیفیت هوا در محیط خارجی مطلوب باشد. در سال‌های اخیر تهویه طبیعی مورد توجه بوده و ساختمان‌های تهویه شده به‌طور طبیعی در سراسر جهان رایج می‌باشند [۸].

در تهویه متقاطع، ورودی و خروجی هوا در مقابل یکدیگر قرار دارند. در تهویه متقاطع برای آن که گرما و آلاینده‌ها به‌طور موثر از محیط خارج شوند، لازم است طول ساختمان در راستای جریان محدود باشد. نوعی دیگر از تهویه که بر اساس اختلاف چگالی عمل می‌کند تهویه دودکشی است. در این نوع تهویه لازم است جریانی که از پنجره ها و دریچه‌ها وارد می‌شود، از طریق دودکش گرما و آلاینده‌ها را خارج سازد. نوعی دیگری از تهویه به نام تهویه یک طرفه یا یک وجهی وجود دارد که کاربرد کمتری نسبت به تهویه دودکشی و تهویه متقاطع دارد. جریان هوا در نوع این تهویه اصولا از اختلاف فشارهای جزئی و نیروهای شناوری ایجاد می‌شود.

۱-۲- پراکندگی آلاینده‌ها

به‌منظور درک رفتار پراکندگی آلاینده‌ها، تأثیر آن‌ها بر روی کیفیت هوای داخل، طراحی مناسب ساختمان‌ها و سیستم‌های تهویه و در نهایت تلاش برای کاهش غلظت آلاینده‌ها ، نیاز به پیش-بینی دقیق توزیع غلظت آلاینده‌ها بر روی ساختمان یا نزدیک آن در سال‌های اخیر افزایش یافته است. هنگامی که یک آلاینده از منبع آن خارج می‌شود، توسط گردابه‌های آشفته جریان که ترکیبی از مکانیزم‌های پخش (دیفیوژن) و انتقال است، پراکنده می‌شود. همواره یک گرادیان غلظت آلاینده وجود دارد به‌طوری که غلظت در مرکز آن بیشتر است و به طرف لبه‌های آلاینده کاهش می‌یابد [۹].

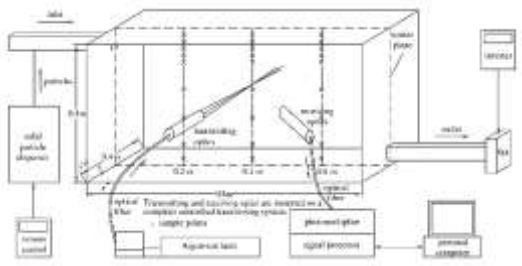
۲- مدل‌سازی

در مقاله حاضر، به بررسی تاثیر تهویه طبیعی بر روی پراکندگی آلاینده‌های جامد، از هندسه تومینیگا و بلاکن [۱۰] استفاده شده است. در مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران در سال-های اخیر، به تاثیر تهویه طبیعی بر روی پراکندگی ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون که خطرناک‌ترین آلاینده‌ها برای سلامتی انسان است، پرداخته نشده است. خلاهای موجود در تحقیقات اخیر سبب شده در این مطالعه، میدان جریان و پراکندگی ذرات معلق در ساختمان مدل تحت تهویه طبیعی مورد بررسی قرار بگیرد. دلیل اصلی استفاده از این هندسه تحت تهویه طبیعی، عدم تحلیل تاثیر تهویه طبیعی بر پراکندگی ذرات معلق و ادامه پژوهش‌های انجام شده در زمینه پراکندگی آلاینده‌های گازی در ساختمان مدل تحت تهویه طبیعی در آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت دانشگاه علم و صنعت ایران است. برای اعتبارسنجی نتایج پراکندگی ذرات جامد معلق بدست آمده از رهیافت‌های RANS و LES، از آزمایش‌های تجربی و عددی چن و همکاران [۱۱] استفاده شده است. در پژوهش چن و همکاران [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی رهیافت RANS و تونل باد به بررسی جریان و پراکندگی آلاینده‌ها در داخل یک ساختمان مدل پرداخته شده است.

در مسئله حاضر، ابتدا به شبیه‌سازی میدان جریان در داخل ساختمان مدل مورد مطالعه چن و همکاران [۱۱] پرداخته شده است. در شکل (۱) هندسه ساختمان استفاده شده چن و همکاران [۱۱] در تونل باد نشان داده شده است. ابعاد ساختمان در راستای x، y و z به ترتیب برابر h2 db=، h و w=h می‌باشد و دریچه ورودی و خروجی نیز برابر h1/0×h1/0 است. در پژوهش چن و همکاران [۱۱] مقدار h را برابر

JECM
9 (1) , 2024
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی

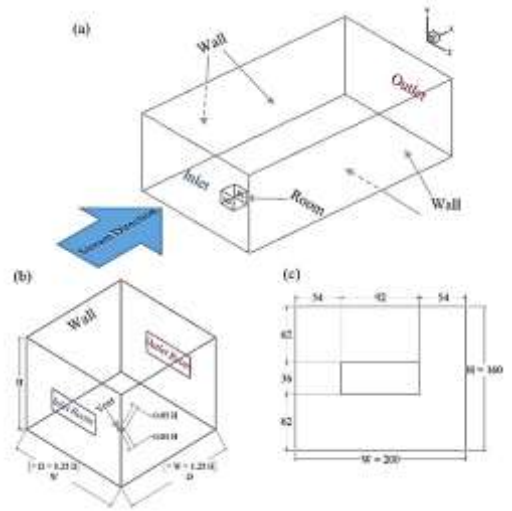
m4/0 و جریان ورودی را به صورت یکنواخت با سرعت ۰/۲۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. ذرات جامد معلق دارای قطر ۱۰ میکرون و چگالی ۱۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشند که به همراه جریان وارد محفظه می‌شود.



شکل ۱ شماتیک ساختمان مورد استفاده چن در تونل باد [۱۱]

در ادامه، پس از صحت سنجی شبیه‌سازی پراکندگی ذرات آلاینده که نتایج آن در بخش صحت‌سنجی نتایج در ساختمان مدل آورده شده است، به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر جریان خارج ساختمان بر روی جریان داخل ساختمان در تهویه طبیعی، از هندسه مورد مطالعه تومینیگا و بلاکن [۱۰] استفاده شده است. مشخصات این دامنه محاسباتی در ادامه ذکر شده است.

انتخاب اندازه‌های دامنه محاسباتی بر اساس پیشنهاد تومینیگا و همکاران [۱۲] صورت گرفته است. مرزهای جانبی و بالایی دامنه محاسباتی در فاصله 5H از ساختمان قرار گرفته‌اند. فاصله ورودی و خروجی جریان از ساختمان نیز، به ترتیب 3H و 15H در نظر گرفته شده است. فاصله جلوی ساختمان برای به حداقل رساندن گرادیان‌های ناخواسته در جهت جریان، این مقدار در نظر گرفته شده است [۱۳].



شکل۲ (الف): دامنه محاسباتی شبیه‌سازی شده، (ب): نمای سه‌بعدی ساختمان شبیه‌سازی شده، (ج): نمای روبه‌روی ساختمان شبیه‌سازی شده (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند)

جدول ۱ شرایط مرزی

ورودی	مشابه شرط آزمایش تونل باد تومینیگا و بلاکن [۱۰] و روش ورتکس[1] با تعداد ورتکس ۱۹۰ [۱۴]
خروجی	فشار استاتیکی صفر و گرادیانی صفر برای متغیرهای جریان
اطراف و بالای دامنه	شرایط مرزی دیوار (به دلیل آزمایش در تونل باد)
کف ساختمان و دامنه	شرط مرزی ورنر و ونگل [۱۵]
مجرای آلاینده	سرعت ثابت بدون شدت توربولانسی[2]

روش ورتکس، یکی از روش‌های ایجاد آشفتگی در رهیافت LES می‌باشد. در روش ورتکس، اغتشاشات از طریق یک میدان ورتیسیتی دو بعدی نوسانی بر روی یک پروفیل سرعت متوسط مشخص در صفحه ورودی عمود بر جهت جریان اضافه می‌شوند. در روش تزریق ورتکس به داخل دامنه محاسباتی فقط به داده‌های متوسط برای پروفیل سرعت، TKE و نرخ اضمحلال آشفتگی در صفحه ورودی مورد نیاز است.

کلیه شبیه‌سازی‌های انجام شده در پایان‌نامه حاضر برمبنای حجم محدود[3] بوده و تمامی محاسبات عددی با استفاده ازبسته نرم‌افزاری انسیس فلوئنت[4] انجام شده است. در رهیافت شبیه‌سازی‌های گردابه‌های بزرگ از مدل‌های زیرشبکه SSLM، DSLM و WALE استفاده شده است. گام زمانی فیزیکی برابر با ۰/۰۰۰۲ ثانیه مورد استفاده مورد استفاده در پایان‌نامه حاضر به گونه‌ای انتخاب شده است که عدد CFL[5] کمتر از واحد بشود. الگوریتم سیمپل[6] به منظور ارتباط میان فشار و سرعت در تمامی شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای گسسته‌سازی زمانی از روش تفاضلی مرکزی محدود مرتبه دوم ضمنی استفاده شده است. روش تفاضل مرکزی محدود[7] برای گسسته سازی مومنتوم مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه‌گیری از داده‌ها[8]، به ۲۰ بار جاروب دامنه محاسباتی توسط جریان ورودی برای رسیدن به همگرایی جریان نیاز بود. برای شبیه‌سازی با مدل‌های انجام شده با استفاده از سیستم ۱۶ هسته‌ای در حدود ۵۵ روز زمان صرف شده است.

۳- نتایج

به منظور اعتبارسنجی پراکندگی ذرات آلاینده از طریق مقایسه با نتایج تجربی، لازم است ابتدا نحوه پراکندگی ذرات در داخل یک ساختمان انجام شود تا نتایج بدست آمده معتبر و قابل استناد باشد. لذا، ابتدا به شبیه‌سازی پژوهش چن و همکاران [۱۱] پرداخته شده است. در این بخش، برای صحت‌سنجی نتایج از مدل زیرشبکه DSLM استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل زیرشبکه، نتایج بدست آمده از پژوهش‌های انجام شده قبلی در آزمایشگاه تحقیقاتی انتقال حرارت می‌باشد. مزیت مدل زیرشبکه DSLM در پیش‌بینی میدان جریان است. ضریب مدل اسماگورینسکی-لیلی به صورت دینامیکی بوده و توسط شخص تعیین نمی‌شود بلکه توسط خود مدل محاسبه

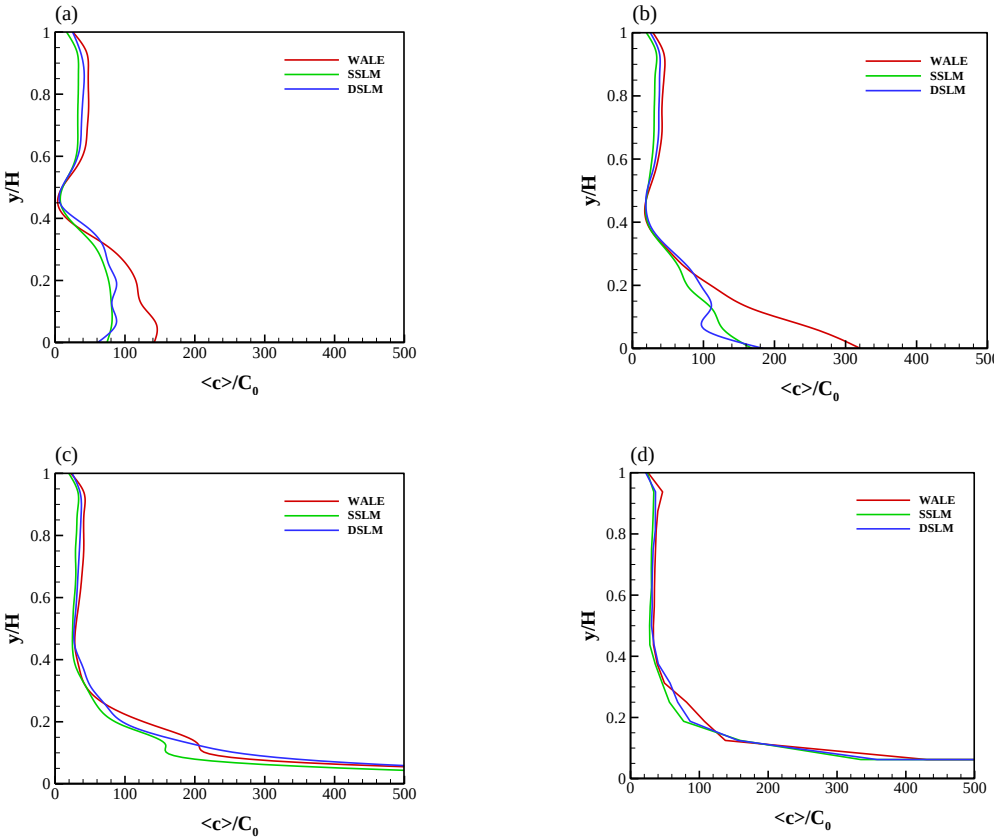
[1] Vortex method
[2] Turbulence intensity
[3] Finite Volume
[4] ANSYS-FLUENT 17

[5] Courant-Friedrichs-Lewy Number
[6] SIMPLE
[7] Bounded central difference method
[8] Data sampling

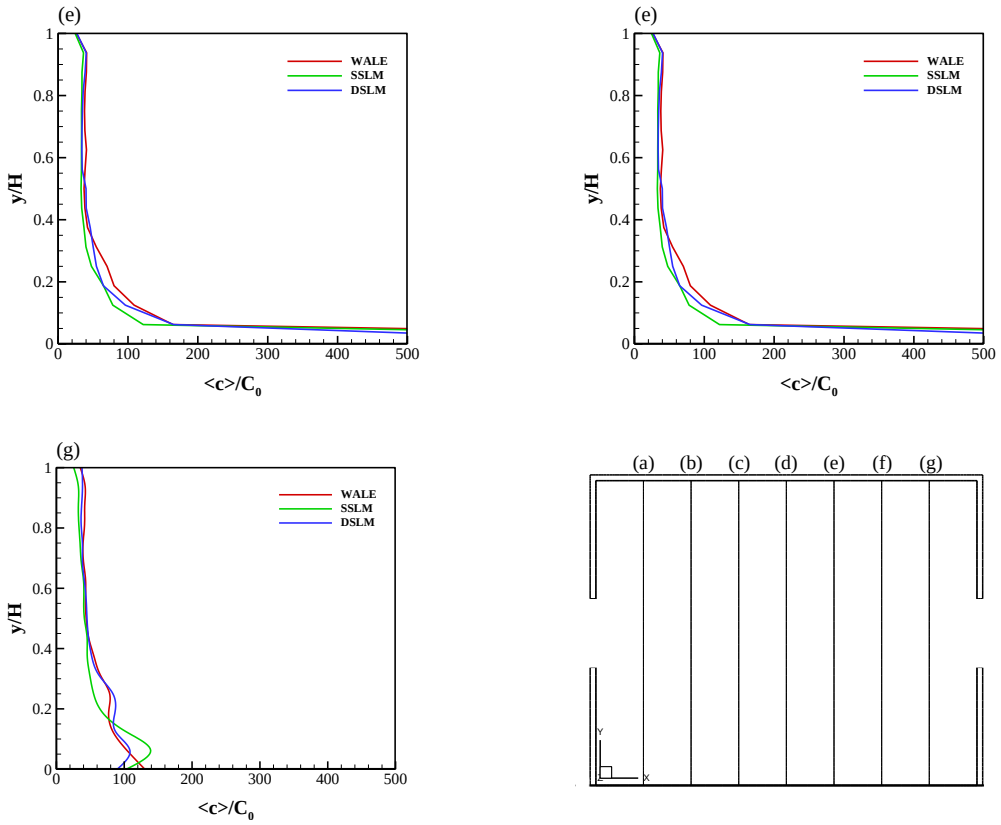
می‌گردد. این ضریب در نزدیکی دیواره‌ها به صورت خودکار کاهش می‌یابد. همچنین مدل زیرشبکه DSLM در پیش‌بینی غلظت متوسط آلاینده‌های گازی دقت قابل قبولی داشته است [۱۶].

در این قسمت به ارائه و تفسیر نتایج شبیه‌سازی غلظت ذرات آلاینده در داخل ساختمان مدل پرداخته شده است و غلظت ذرات در ساختمان مدل تحت تهویه طبیعی آورده شده است.

نتایج غلظت متوسط بی‌بعد شده حاصل از رهیافت LES در صفحه مرکزی هندسه در شکل) نمایش داده شده است. در شکل) مشاهده می‌شود که در نیمه بالایی ساختمان نتایج شبیه‌سازی بر یک‌دیگر منطبق می‌باشند و در قسمت پایینی جت ورودی در زیرشبکه‌های WALE، SSLM و DSLM اختلافاتی وجود دارد. در نیمه ورودی ساختمان، یعنی در ۰/۳۷۵ و ۰/۲۵۰، ۰/۱۲۵ =x/Db اختلاف عملکرد مدل زیرشبکه WALE در پیش‌بینی غلظت ذرات با مدل‌های زیرشبکه SSLM و DSLM به ترتیب ۲۵ و ۱۸ درصد است و مدل زیرشبکه DSLM نیز ۱۴ درصد با مدل زیرشبکه SSLM در شبیه‌سازی میدان غلظت ذرات اختلاف دارد. در ۰/۵۰۰ =x/Db مدل زیرشبکه WALE در پیش‌بینی غلظت ذرات با مدل‌های زیرشبکه SSLM و DSLM به ترتیب ۱۷ و ۱۲ درصد است و مدل زیرشبکه DSLM نیز ۱۴ درصد با مدل زیرشبکه SSLM در شبیه‌سازی غلظت ذرات اختلاف دارد. در نیمه خروجی ساختمان یعنی ۰/۸۷۵ و ۰/۷۵۰، ۰/۶۲۵ =x/Db نیز مدل زیرشبکه WALE با مدل‌های زیرشبکه SSLM و DSLM، ۱۵ و ۹ درصد اختلاف دارد و در عملکرد DSLM با مدل زیرشبکه SSLM نیز ۱۴ درصد اختلاف وجود دارد. از دلایل اختلاف مدل‌های زیرشبکه در پیش‌بینی غلظت متوسط می‌توان به خطای ایجاد شده در محاسبه سرعت از حل معادله مومنتوم وارد معادلات پراکندگی ذرات شده و سبب ایجاد اختلاف بین مدل‌های زیرشبکه شده باشد. مورد دیگر می‌توان به عدم توانایی مدل‌های زیرشبکه در پیش‌بینی غلظت ذرات نام برد.



JECM
9 (1) , 2024
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی



شکل ۳ مقایسه نتایج غلظت متوسط زمانی بدست آمده از مدل‌های زیرشبکه WALE، SSLM و DSLM در (در صفحه مرکزی z/W = 0)، در مقطع‌های: (a) x/Db = 0.125، (b) x/Db = 0.250، (c) x/Db = 0.375، (d) x/Db = 0.500، (e) x/Db = 0.625، (f) x/Db = 0.750، (g) x/Db = 0.875

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، میدان جریان و پراکندگی ذرات جامد معلق در ساختمان با و بدون تهویه طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. رهیافت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از سه مدل زیرشبکه WALE، SSLM و DSLM برای انجام محاسبات مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین یافته‌های پایان‌نامه حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- بیشترین غلظت آلاینده‌ها، به خصوص ذرات جامد، در نزدیکی کف ساختمان و نواحی که ناشی از جریان چرخشی ایجاد شده و تاثیر نیروی جاذبه بر روی آن‌هاست، لذا در ساختمان‌های دارای تهویه طبیعی، دریچه‌های ورودی جریان هوا باید به گونه‌ای طراحی شود که کمترین ناحیه جریان چرخشی در ساختمان به وجود بیاید.
- مقدار غلظت ذرات معلق در کل ساختمان بیشتر از مقدار غلظت متوسط آلاینده‌های گازی پیش‌بینی شده است.

۵- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافعی ندارند.

۶- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی‌ای برخوردار نبوده است.

۷- مراجع

[1] Z. F. Tian, J. Y. Tu, G. Yeoh, and R. Yuen, "Numerical studies of indoor airflow and particle dispersion by large Eddy simulation," Building and Environment, vol. 42, no. 10, pp. 3483-3492, 2007.

[2] H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, and S. Jafari, "Simulations of indoor airflow and particle dispersion and deposition by the lattice Boltzmann method using LES and RANS approaches," Building and Environment, vol. 102, pp. 1-12, 2016.

[3] M. Ellis and E. Mathews, "Needs and trends in building and HVAC system design tools," Building and environment, vol. 37, no. 5, pp. 461-470, 2002.

[4] Y. Jiang and Q. Chen, "Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation," Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics, vol. 89, no. 13 ,pp. 1155-1178, 2001.

[5] M. J. Doughty, K. A. Blades, and N. Ibrahim, "Assessment of the number of eye symptoms and the impact of some confounding variables for office staff in non - air - conditioned buildings," Ophthalmic and Physiological Optics, vol. 22 ,no. 2, pp. 143-155, 2002.

[6] F. Yang, Y. Kang, Y. Gao, and K. Zhong, "Numerical simulations of the effect of outdoor pollutants on indoor air quality of buildings next to a street canyon," Building and Environment, vol. 87, pp. 10-22, 2015.

[7] N. Gao, J .Niu, M. Perino, and P. Heiselberg, "The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings: tracer gas simulation," Building and Environment, vol. 43, no. 11, pp. 1805-1817, 2008.

[8] M.-F. King et al., "Modelling urban airflow and natural ventilation using a GPU-based lattice-Boltzmann method," Building and Environment, vol. 125, pp. 273-284, 2017.
[9] T. Stathopoulos, B. Hajra, and A. Bahloul, "Analytical Evluation of Dispersion of Exhaust from Rooftop Stacks on Buildings," 2008.
[10] Y. Tominaga and B. Blocken, "Wind tunnel analysis of flow and dispersion in cross-ventilated isolated buildings: Impact of opening positions," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 155, pp. 74-88, 2016.
[11] F. Chen, C. Simon, and A. C. Lai, "Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift–flux model," Atmospheric Environment, vol. 40, no. 2, pp. 357-367, 2006.
[12] Y. Tominaga et al., "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings," Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, vol. 96, no. 10-11, pp. 1749-1761, 2008.
[13] B. Blocken, "Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities ,limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations," Building and Environment, vol. 91, pp. 219-245, 2015.
[14] T. van Hooff, B. Blocken, and Y. Tominaga, "On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments," Building and Environment, vol. 114, pp. 148-165, 2017.
[15] J. Franke, A. Hellsten, K. H. Schlunzen, and B. Carissimo, "The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary," International Journal of Environment and Pollution, vol. 44, no. 1-4, pp. 419-427, 2011.
[16] F. Bazdidi-Tehrani, S. Masoumi-Verki, P. Gholamalipour, and M. Kiamansouri, "Large eddy simulation of pollutant dispersion in a naturally cross-ventilated model building: Comparison between sub-grid scale models," in Building Simulation, 2019, vol. 12: Springer, pp. 921-941 .

JECM
9 (1) , 2024
دوره ۹، شماره ۱
تابستان ۱۴۰۳
دوفصلنامه پژوهشی

COPYRIGHTS
©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)