

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(3) (2021) 347-350 DOI: 10.22060/mej.2019.16946.6481



Investigation of the Effect of Ventilation System Inlet Location on Particle Motion in a Room Using Multi Relaxation Time-Lattice Boltzmann Method

H. Sajjadi^{1,2,*}, G. Ahmadi^{2,3}, A. Amiri Delouei^{1,2}

¹ Faculty of Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

² Center for International Scientific Studies and Collaboration, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

³ Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Clarkson University, New York, United States of America

ABSTRACT: In this work multi-relaxation time lattice Boltzmann method is used to investigate the effect of the inlet air location on particle motion in a room. The scaled modeled room is one-tenth scale of a full-size room with dimensions of 0.914 m \times 0.305 m \times 0.457 m. For an inlet air with dimension of 0.101 m \times 0.101 m, two locations (ceiling and floor) are studied. The large Eddy simulation with the standard Smagorinsky model is utilized to simulate the turbulent indoor airflow. Particles with 1 and 10 micrometer sizes are selected for investigation of particle dispersion and deposition in the room. The simulation results for number of deposited particles and those exiting the room show that when the inlet air is on the floor, the number of larger 10 μ m particles leaving through the exhaust register is more than the case for inlet on the ceiling. For smaller 1 μ m particles, however, no significant difference between the floor and ceiling inlet air for particles leaving the room thought the exhaust register is seen. The present results also show that the gravity significantly affects the particle deposited 1 μ m particles when the inlet air is at ceiling.

Review History:

Received: Aug2019-08-24 Revised: Nov. 06, 2019 Accepted: Dec. 09, 2019 Available Online: Dec. 26, 2019

Keywords:

Lattice Boltzmann method Multi relaxation time Particle deposition and dispersion Large Eddy simulation

1. Introduction

In the last two decades, the importance of turbulent airflow simulation in the context of indoor air pollution has increased. Therefore, various methods have been proposed to simulate airflow and particulate pollutant transport in indoor environment. In the last decade, Lattice Boltzmann Method (LBM) has received considerable attentions for simulating fluid flow, heat transfer and particle motion in complex passages [1-3].

Krafczyk et al. [4] analyzed turbulent flows using the Multiple Relaxation Time (MRT) LBM and the Large Eddy Simulation (LES) with the aid of the standard Smagorinsky model. Their results indicate that the MRT method is more stable than Single Relaxation Time (SRT). Jafari and Rahnama [5] investigated turbulent flows in a channel using the LBM and LES. They used the sheared improved Smagorinsky model to model small eddies and showed that the results of their model fit well with the direct numerical solution results.

Salmanzadeh et al. [6] studied turbulent airflow in a channel using the LES model and examined the effect of subgrid scale eddies on particle deposition velocity. They showed that the subgrid fluctuation velocities have a significant effect on small particle deposition, but their effect on large particles is not important.

Sajjadi et al. [7] investigated the turbulent indoor air flow using a hybrid model and examined the particle dispersion and deposition behavior. They compared their results with the previous experimental data and available simulations and showed that the LBM could predict the turbulent flow feature and the particle deposition and dispersion with good accuracy.

As the previous works showed, studies of particulate pollutant transport have received much attention due to its importance in human health. However, due to the complexity and extensive computational time requirement for resolving the details of turbulent flows and particle motions in a room, the analysis of these types of flow has been limited. Therefore, in this study we used the LBM as an efficient technique and predicted the turbulent airflows for various conditions in a modeled room. In addition, the trajectories of micro-particles were investigated. Particular attention was given to the influence of the inlet air location on the particle dispersion and deposition in the room.

2. Problem Statement

The geometry of the present work is shown in Fig. 1. The present geometry is a one-tenth scale of a full-size office. The dimensions of the present scaled room are 0.914 m, 0.305 m and 0.457 m, respectively, in x, z and y directions.

3. LBM-LES Model

In this study, the MRT_LBM method with D3Q19 lattice is used for the three dimensional flow simulations in the scaled

*Corresponding author's email: h.sajjadi@ub.ac.ir

hasansajadi@gmail.com Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode. room. In this method to evaluate the distribution function for velocity the following distribution function are used [7]:

$$f_i(x+c_i\Delta t,t+\Delta t) = f_i(x,t) - M_{ij}^{-1} S_{jk} [R_k(x,t) - R_k^{eq}(x,t)]$$
(1)

where fi is the velocity distribution function, Δt is the lattice time step, which was set to unity and ci is the discrete fluid particle velocity vectors are shown in Fig. 2. Mij (transformation matrixes), Sjk (diagonal matrixes of relaxation rates), Rk, Rkeq are described in reference [5].

4. Particle Motion Equation

z Ě

The equation of motion for small particles is given as [8]

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D R e_p}{24} (u_i - u_i^p) + (1 - \frac{1}{s})g_i + n_i(t)$$
(2)

Fig. 1. Geometry of the scaled room studied.



Fig. 2. Discrete velocity vectors for D3Q19.

where the first term on the right hand of the Eq. (2) is the drag force, the second term is the buoyancy force and the third term is the Brownian force.

5. Results and Discussion

A comparison of the predicted velocity profile at a section of the modeled room with the previous numerical and experimental data [9,10] is shown in Fig. 3. As it is seen that the present results are in a good agreement with the earlier experimental data and LES simulations.

The total number of deposited particles on the walls of the modeled room when the inlet air is located on the ceiling and floor are shown, respectively, in Figs. 4 and 5. It is captured that the number of deposited 10 µm particles is more than 1 µm for both locations due to gravity force.

6. Conclusions

In this paper, the MRT-LBM in conjunction with the LES model was used to solve the turbulent indoor airflow in a



Fig. 3. Vertical velocity along the horizontal line at mid-partition height from the left wall to the right wall



Fig. 4. Number of deposited particles on the various surfaces for the inlet air register on the ceiling.



Fig. 5. Number of deposited particles on the various surfaces for inlet air location on the floor.

scaled room. In order to investigate the effect of the inlet air location on the particles behavior, two different positions for inlet air were considered. Motions of 1 and 10 μ m particles are simulated for different cases the simulation results showed that when the inlet air location was on the floor, the number of 10 μ m particles that exited the room was larger than the case that the inlet was that on the ceiling. For the 1 μ m particle, however, the simulation results are almost the same both cases. The number of deposited 10 μ m particles was much more than the 1 μ m particles for both configurations.

References

[1] H. Sajjadi, A.A. Delouei, Investigation of 3 Dimensional Nano fluid Natural Convection in Presence of Magnetic Field using Double Multi Relaxation Time Lattice Boltzmann Method, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 51 (2019) 1-14.

- [2] H. Sajjadi, A. A. Delouei, M. Izadi, R. Mohebbi, Investigation of MHD natural convection in a porous media by double MRT lattice Boltzmann method utilizing MWCNT–Fe3O4/water hybrid nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 132 (2019) 1087– 1104.
- [3] H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, S. Jafari, Turbulent Indoor Airflow Simulation Using Hybrid LES/ RANS Model Utilizing Lattice Boltzmann Method, Computers and fluids, 150 (2017) 66-73.
- [4] M. Krafczyk, J. Tölke, L.S. Luo, Large eddy simulation with a multiple-relaxationtime LBE model. International Journal of Modern Physics B 17(1&2) (2003) 33-39.
- [5] S. Jafari and M. Rahnama, Shear-improved Smagorinsky modeling of turbulent channel flow using generalized Lattice Boltzmann equation. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 67 (2011) 700–712.
- [6] M. Salmanzadeh, M. Rahnama, G. Ahmadi, Effect of subgrid scales on large eddy simulation of particle deposition in a turbulent channel flow. Journal of Aerosol Science and Technology 44 (2010) 796–806.
- [7] H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, S. Jafari, Investigation of particle deposition and dispersion using Hybrid LES/RANS model based on Lattice Boltzmann method, Scientia Iranica 25 (2018) 3173-3182.
- [8] A. Li, G. Ahmadi, Dispersion and deposition of spherical particles form point sources in a turbulent channel flow. Aerosol Science and Technology 16 (1992) 209–226.
- [9] J.D. Posner, C.R. Buchanan, D. Dunn-Rankin, Measurement and prediction of indoor air flow in a model room. Energy and Buildings 35 (2003) 515–526.
- [10] Z.F. Tian, J.Y. Tu, G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor air flow. Building and Environment 41 (2006) 1504–1514.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Sajjadi, G. Ahmadi, A. Amiri Delouei, Investigation of the Effect of Ventilation System Inlet Location on Particle Motion in a Room Using Multi Relaxation Time-Lattice Boltzmann Method, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 347-350. DOI: 10.22060/mej.2019.16946.6481



This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳، شماره ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۴۵۷ تا ۱۴۶۸ DOI: 10.22060/mej.2019.16946.6481

بررسی تاثیر مکان دریچه ورودی سیستم تهویه بر رفتار ریزگردها داخل اتاق با استفاده از روش شبكه بولتزمن چند زمانه

حسن سجادی ^{۲۹*}، گودرز احمدی^{۴۹۳}، امین امیری دلوئی^{۲۹۱}

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران ۲- مرکز مطالعات و همکاری های بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران ٣- دانشکده مکانیک و هوا فضا، دانشگاه کلارکسون، نیویورک، آمریکا

خلاصه: در این مقاله از روش عددی شبکه بولتزمن بر پایه مدل زمان آرامش چند گانه برای بررسی تاثیر مکان دریچه ورودی هوا بر رفتار ریزگردها داخل ساختمان استفاده شده است. هندسه مورد بررسی در این مقاله اتاقی با نسبت ۰/۱ یک اتاق واقعی با ابعاد ۲/۹۱۴×۷/۴۵۷×۰/۴۵۷ متر انتخاب شده و دو موقعیت مختلف (سقف و کف) برای دریچه ورودی هوا با ابعاد ۱۰۱/۰×/۱۰۱ متر در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه جریان داخل اتاق مغشوش است از مدل حل ادیهای بزرگ همراه مدل استاندارد اسماگورنسکی استفاده شده است. همچنین ذرات با ابعاد ۱ و ۱۰ میکرومتر برای بررسی نحوه انتشار و ته نشینی بر روی دیوارههای اتاق انتخاب گردیده است. تعداد ذرات ته نشین شده و همچنین خارج شده از اتاق برای ذرات با اندازه های مختلف نشان داد، هنگامی که دریچه در کف اتاق قرار دارد خروجی ذرات با سایز بزرگ (۱۰ میکرومتر) نسبت به حالتی که دریچه در سقف قرار دارد بیشتر است و از لحاظ کیفیت، هوای داخل اتاق مناسبتر خواهد بود. اما برای ذرات با سایز کوچک (۱ میکرومتر) تفاوت چندانی در خروجی ذرات مشاهده نشد. نتایج نشان داد که نیروی گرانش تاثیر زیادی در ته نشینی ذرات روی کف اتاق دارد به طوری که برای حالت دریچه ورودی هوا در سقف، میزان ته نشینی ذرات با اندازه ۱۰ میکرومتر بر روی کف بسیار بیشتر (حدود ۱۰۰ برابر) از ذرات با اندازه کوچک (۱ میکرومتر)است..

تاريخچه داورى: دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸ ارائه أنلاين: ١٣٩٨/١٠/٠٥

كلمات كليدى: روش شبكه بولتزمن مدل زمان آرامش چندگانه ته نشینی ذرات مدل حل ادیهای بزرگ

بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپیک و معادله جنبشی مزوسکوپیک^۳

استوار است که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم، برای شبیهسازی

مکانیک پیوسته به کار گرفته می شود [۳-۱]. در روش شبکه بولتزمن،

کلیه محاسبات صریح بوده و نیاز به حل هیچ دستگاهی از معادلات

نیست. به دلیل ماهیت موضعی محاسبات، این روش به سادگی قابلیت

موازی شدن را دارد [۴]. هان و همکاران^۴ [۴] نشان دادن با استفاده

از قابلیت برنامه نویسی موازی در روش شبکه بولتزمن زمان محاسبات

نسبت به روش حجم محدود بسیار کاهش یافت. همچنین به دلیل

سهولت اعمال شرایط مرزی، برای حل مسائلی که دارای هندسه

پیچیده هستند دارای کاربرد فراوانی است. از کاربردهای مهم آن

می توان به شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت در مسائلی مانند

جریان درهم، جریان با مرزهای پیچیده (اجسام متخلخل، سطوح

منحنی متحرک و...)، جریان چندفازی و جریان سیال غیرنیوتنی

(شبیهسازیهای جریان خون) اشاره کرد [۷-۵].

۱- مقدمه

از دیرباز بحث شبیهسازی جریان مغشوش داخل ساختمان مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. در دو دهه گذشته اهمیت این موضوع با توجه به بحث آلودگی هوای داخل ساختمان بسیار بیشتر شده است لذا روشهای مختلفی برای حل این نوع جریان و همچنین بررسی انتقال ذرات و آلودگی در محیطهای داخلی مطرح گردیده است. به همین دلیل پژوهشگران در حال انجام مطالعات گسترده به منظور بهدست آوردن راه حلهایی هستند که علاوه بر دقت بالا، زمان محاسباتی پائینی داشته باشند.

در دهه اخیر روش شبکه بولتزمن ٔ برای شبیهسازی جریان سیال و انتقال حرارت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. برخلاف روش های دینامیک سیالات محاسباتی^۲ مرسوم، روش شبکه

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: h.sajjadi@ub.ac.ir

Lattcie Boltzmann Method

2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Mesoscopic Han et al. 4

3

⁽Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) 🖌 در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

با توجه به خصوصیات جریان های مغشوش و دقت به این موضوع که اکثر جریان های کاربردی داخل اتاق از نوع مغشوش هستند این نوع جریان مورد توجه بسیاری از مهندسان و محققان است [۸]. با وجود کوششهای بسیاری که تا به امروز در این زمینه صورت گرفته است به دلیل پیچیدگی، این نوع جریان هنوز از مسائل حل نشده و پیچیدہ علوم فیزیک می باشد. برای حل جریان مغشوش مدل های مختلفی ارائه شده است که هر کدام برای رژیمهای خاص جریان و حتی در ناحیه خاصی از جریان معتبر میباشند. یکی از روش های متداول در مسایل مهندسی برای حل جریان مغشوش روش معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس است که به علت زمان محاسباتی کم مورد توجه بسیاری از مهندسین قرار گرفته است [۹ و ۱۰]. ولی با توجه به اینکه این روش فقط نتایج متوسط گیری شده را ارائه می دهد و قادر به حل اغتشاش موجود در جریان مغشوش نمی باشد، در تحلیل رفتار ذرات که سرعتهای نوسانی نقش بسیار مهمی دارند، دقت کمی دارد. در مقابل روش معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس روش حل مستقیم عددی ٔ قرار دارد که تمام جریان را به صورت مستقیم و بدون استفاده از هیچ مدلی حل می کند [۱۱]. مشکل روش حل مستقیم عددی زمان محاسباتی بالای مورد نیاز است، به همین دلیل مهندسین و دانشمندان علاقه زیادی به استفاده از این روش ندارند. روش دیگری که در واقع روشی است بین معادلات متوسط گیری شده و حل مستقیم عددی، شبیهسازی ادیهای بزرگ^۳ میباشد [۱۲]. در این روش ادیهای بزرگ به صورت مستقیم حل می شوند و ادیهای کوچکتر از پارامتر فیلتر، مدل میشوند.

از آنجا که وقت عمده انسانها در محیط داخل اتاق می گذرد بحث هوای داخل اتاق بسیار مهم تر از خارج است زیرا کیفیت هوای داخل اتاق بر سلامتی انسانها تاثیر گذار است. در ساختمانهای مدرن امروزی دستگاههای مختلفی برای تامین هوای مورد نیاز اتاقها استفاده می شود این سیستمها مقدار زیادی انرژی نیز مصرف می کنند و از این جهت بررسی هوای داخل اتاق از نظر انرژی حائز اهمیت شده است. جریان داخل اتاق به دلیل اینکه شامل جریان جابجایی آزاد، اجباری و یا هر دو می باشد از پیچیدگی خاصی برخوردار است [۱۳].

می گیرد که می تواند رژیم جریان آرام، گذار و یا مغشوش را ایجاد کند. بررسی آزمایشگاهی این گونه جریان ها پرهزینه است به همین دلیل شبیه سازی های عددی از جذابیت خاصی بین محققین برخوردار می باشد [18–۱۴].

کرافزیک و همکاران[†] [۱۷] در سال ۲۰۰۳ جریان مغشوش را با استفاده از روش شبکه بولتزمن، مدل ادیهای بزرگ و اسماگورنسکی استاندارد و زمان آرامش چندگانه تحلیل نمودند، آنها نشان دادند که پایداری این روش بیشتر از زمان آرامش ثابت است. جعفری و رهنما^ه [۱۸] در سال ۲۰۱۱ جریان داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل حل ادیهای بزرگ تحلیل کردند. آنها از مدل بهبود یافته اسماگورنسکی برای مدل کردن ادیهای کوچک استفاده نمودند و نشان دادند که نتایج این مدل با نتایج حل مستقیم عددی همخوانی خوبی دارد.

با توجه به اهمیت بحث نشست و انتقال ذرات در سیستمها و فضاهای بیمارستانی و غیره در سه دهه اخیر این موضوع مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. وود ۶ [۱۹] در سال ۱۹۸۱ با استفاده از روش تحلیلی، سرعت نشست ذرات را برای سطوح صاف و ناهموار بهدست آورد. او نشان داد که این روش برای سطوح صاف نتايج قابل قبولى مىدهد اما براى سطوح ناهموار نتايج دقت بالايي ندارند. پاپاورگوس و هیدلی^۷ [۲۰] در سال ۱۹۸۴ نتایج آزمایشگاهی مربوط به نشست ذرات در کانال را ارائه کردند. ژانگ و احمدی^ [۲۱] در سال ۲۰۰۰ جریان داخل کانال عمودی و افقی را تحلیل نمودند و سرعت نشست ذرات را بررسی نمودند. آنها اثر پارامترهای مختلف از جمله شتاب جاذبه زمین و اندازه ذره را بر روی سرعت نشست بررسی کردند و نشان دادند که در کانال افقی شتاب جاذبه باعث افزایش سرعت نشست بر روی دیواره پایین میشود. سلمان زاده و همکاران ٔ [۲۲] در سال ۲۰۱۰ جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از مدل ادیهای بزرگ تحلیل کردند و اثر ادیهای زیر شبکه را بر روی سرعت نشست بررسی نمودند. آنها نشان دادند که سرعت نوسانی ناشی از ادیهای زیر شبکه بر روی نشست ذرات کوچک تاثیر مهمی

- 6 Wood
- 7 Papavergos and Hedley
- 8 Zhang and Ahmadi
- 9 Salmanzadeh et al.

¹ Reynolds Average Navier Stocks (RANS)

² Direct Numerical Simulation (DNS)

³ Large Eddy Simulation (LES)

⁴ Krafczyk et al.

⁵ Jafari et al.

دارد ولی برای ذرات بزرگ اهمیت زیادی ندارند. تیان و احمدی^۱ [۲۳] در سال ۲۰۰۷ جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از مدل متوسط گیری شده معادلات ناویر استوکس حل نمودند و سرعت نشست ذرات را برای مدلهای مختلف محاسبه کردند. آنها بدلیل اینکه نتایج مدل معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس به صورت میانگین میباشد و فاقد سرعتهای نوسانی هستند و از طرفی این سرعتهای نوسانی نقش مهمی در نشست ذرات دارند ، برای بهدست آوردن سرعت نوسانی از مدل گسسته سازی تصادفی^۲ که روشی برای ایجاد مصنوعی سرعتهای نوسانی است، استفاده کردند. آنها نشان دادند که اصلاح سرعت نوسانی عمود بر دیواره تاثیر زیادی در نتایج دارد و باعث بهبود نتایج میشود.

جعفری و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۱۰ جریان داخل یک کانال با یک مانع مربعی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن تحلیل کردند. آنها نشست و انتشار ذرات را برای این هندسه مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که روش شبکه بولتزمن میدان جریان را به خوبی حل کرده و رفتار ذرات به خوبی قابل بررسی است. دینگ و همکاران^۳ [۲۵] در سال ۲۰۱۲ نشست و انتقال ذرات داخل یک اتاق را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و زمان آرامش چندگانه مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج بدست آمده برای جریان و ذرات با استفاده از روش شبكه بولتزمن را با نتايج نرم افزار فلوئنت مقايسه كردند و نشان دادند که نتایج همخوانی خوبی دارند. سمری کرمانی و همکاران ^۴[۲۶] در سال ۲۰۱۴ جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل بهبود یافته اسماگورنسکی حل کردند و نشست ذرات با اندازههای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که این روش قادر است سرعت نشست ذرات را با دقت قابل قبولی محاسبه نماید. اما آنها اثر سرعت نوسانی ادیهای زیر شبکه را بر روی نشست ذرات مورد بررسی قرار ندادند. سجادی و همکاران^۵ [۲۷] در سال ۲۰۱۸ جریان مغشوش داخلی را با استفاده از مدل هیبریدی تحلیل کردند و رفتار ذرات را مورد بررسی قرار دادند آنها نشان دادند که روش شبکه بولتزمن توانایی تحلیل جریان

مغشوش و رفتار ذرات را به خوبی دارد. کوهستانی و همکاران^۶ [۲۸] در سال ۲۰۱۹ ته نشینی ذرات غیر دایرهای را با استفاده از ترکیب روش شبکه بولتزمن و پروفایل مسطح^۷ بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که روش جدید استفاده شده با دقت بالایی رفتار ذرات را پیش بینی کرد.

همانطور که بررسی تحقیقات گذشته نشان میدهد با توجه به اهمیت سلامتی انسانها، امروزه بررسی رفتار ذرات و آلایندهها مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. اما به دلیل پیچدگی و زمان محاسباتی بالای حل جریان مغشوش و رفتار ذرات داخل اتاق، تحلیل این نوع جریانها کمتر انجام شده است و بیشتر هندسههای ساده همچون کانال که در واقعیت استفاده چندانی ندارند مورد بررسی قرار گرفته است. لذا هدف اصلی این مقاله استفاده از روش شبکه بولتزمن به عنوان یک روش کارآمد در حل جریانهای مغشوش برای بررسی رفتار ذرات داخل اتاقی با نسبت ۱/۱ اتاق واقعی خواهد بود و تاثیر مکان دریچه ورودی بر رفتار ذرات برای اولین بار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- هندسه مورد بررسی

با توجه به این موضوع که حل جریان داخل یک اتاق با اندازه واقعی نیازمند صرف زمان و هزینه بسیار بالایی میباشد معمولا برای حل آزمایشگاهی و عددی جریان بر اساس تحلیل ابعادی از هندسههای کوچکتر استفاده میشود و پارامترهای مهم در حل جریان را برابر هندسه واقعی در نظر می گیرند. در این مقاله یک اتاق با نسبت ابعادی ۱/۰ نسبت به اتاق واقعی که دارای یک ورودی و خروجی است مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مورد بررسی همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است اتاقی با ابعاد ۱/۰×۲۰۰۰×۲۰۵۸ متر است. دو موقعیت مختلف برای هوای ورودی در نظر گرفته شده است به طوریکه جریان هوا به صورت عمودی از دریچه ورودی در میشود. ابعاد دریچه ورودی و خروجی واقع در سقف خارج میشود. ابعاد دریچه ورودی و خروجی یکسان و برابر ۱۰/۱۰×۱۰/۱ متر میباشد (ابعاد واقعی ۱۰۱×۱۰۱ سانتیمتر است). عدد رینولدز مدر مریان بر پایه طول دریچه ورودی و سرعت جریان ورودی برابر با

¹ Tian and Ahmadi

² Disceret Random Walk

³ Ding et al.

⁴ Samari et al.

⁵ Sajjadi et al.

⁶ Kohestani et al.

⁷ Smoothed profile method



Fig. 1. Present geometry شکل ۱: هندسه مورد بررسی

> سینماتیکی سیال برابر ۵–۱۰×۱/۴۸ مترمربع بر ثانیه میباشند. سیال مورد بررسی تراکمناپذیر و نیوتنی است همچنین جریان مغشوش در نظر گرفته شده است.

که در ان
$$\delta x$$
 ، δt ، δz و δt به ترتیب مقادیر ثابت طول و زمان در شبکه هستند که برابر یک در نظر گرفته شدهاند.

$$R = MF \tag{(7)}$$

با توجه به پایداری بیشتر روش زمان آرامش چندگانه، در این پژوهش از این روش استفاده گردید بر اساس این روش برای شبکه D3Q19 (شکل ۲) داریم [۲۹]:

$$f_i(x+c_i\Delta t,t+\Delta t) = f_i(x,t) - M_{ij}^{-1} \cdot S_{jk} \cdot [R_k(x,t) - R_k^{eq}(x,t)]$$
(1)

در رابطه (۱) c_i نشان دهنده سرعت ذرات بوده که برای شبکه

D3Q19 به صورت زیر بیان میشوند.

$$c_{i} = \begin{cases} (0,0) & i = 0\\ c(\pm 1,0,0), c(0,\pm 1,0), c(0,0,\pm 1) & i = 1-6\\ c(\pm 1,\pm 1,0), c(\pm 1,0,\pm 1), c(0,\pm 1,\pm 1) & i = 7-18 \end{cases}$$
(Y)



Fig. 2. The discrete velocity vectors for D3Q19 شکل ۲. بردارهای سرعت برای شبکه D3Q19

در رابطه (۳)، F ماتریس توابع توزیع (f) است و ماتریس M از رابطه زیر محاسبه می شود: - 1 -30 -11 -11 -11 -11 -11 -11 -4 -4 -4 -4 -4 -4 $^{-1}$ $^{-1}$ $^{-1}$ -1 $^{-1}$ -1 -1 $^{-1}$ -1 $^{-1}$ $^{-1}$ -1 _4 M =-1 $^{-1}$ $^{-1}$ -1 _2 -4 -4 -2 -1 $^{-1}$ $^{-1}$ $^{-1}$ -2 -1 -2 $^{-1}$ $^{-1}$ $^{-1}$ $^{-1}$

-1

0 0 0

-1

مقادیر مربوط به زمان آرامش برای هندسه مورد بررسی به صورت زیر می باشند [۲۵]:

1 -1 1 -1 -1 1 -1

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 -1 -1

0 0

0 0 0

 $^{\sim}$

0 0 0 0

 $0 \qquad 0 \qquad 0 \qquad -1 \quad -1 \quad 1 \quad 1 \quad 0$

0 0 0 0 0 0 1 1 -1 -1 -1

$$S_{ij} = diag(s_0, s_1, ..., s_{18})$$
 (Δ)

 $s_1 = 1.19$ (7)

$$s_0 = s_3 = s_5 = s_7 = 0.$$
 (Y)

$$s_9 = s_{11} = s_{13} = s_{14} = s_{15} = \frac{1}{(3\nu_t + 0.5)} \tag{(A)}$$

- معادله حرکت ذره معادله کلی حرکت ذرات به صورت زیر است [۳۰]: $\frac{du_i^p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_i^p) + (1 - \frac{1}{s})g_i + n_i(t)$

در ادامه پارامترهای موجود در رابطه (۲۲) به ترتیب معرفی خواهند شد. u_i^p سرعت ذره در جهت i میباشد و برابر است با u_i^p است $u_i^p = \frac{dx_i}{dt}$. میباشد که برای آن داریم (۲۲) نیروی پسا بر واحد جرم ذره میباشد که برای آن داریم (۳۰).

$$\tau_p = \frac{Sd^2C_c}{18\nu} \tag{(77)}$$

رمان آرامش ذره' میباشد، S نسبت چگالی ذره به سیال
$$au_p$$
 زمان آرامش ذره' میباشد، C نسبت چگالی ذره به سیال است و C_c ضریب تصحیح کانینگهام و برابر است با [۳۰]:
 $C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{\frac{-1.1d}{\lambda}})$ (۲۴)

میآید [۳۰]: طر ذره و λ متوسط پویش آزاد مولکولی و مقدار آن برابر d است با C_D .۲×۱۰^{-۸} است با میباشد و از رابطه زیر بهدست میآید [۳۰]:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \qquad Re_p < 1 \tag{Y\Delta}$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15Re_p^{0.687}) \qquad 1 < Re_p < 400$$

که
$$Re_p^p$$
 معرف عدد رینولدز ذره میباشد و داریم $Re_p = rac{d\left|u_{rel}
ight|}{V}$ $u_{rel} = u_j - u_j^p$ جزء دوم در سمت راست رابطه (۲)۲ اثر نیروی جاذبه و نیروی

$$s_2 = s_{10} = s_{12} = 1.4 \tag{9}$$

$$s_4 = s_6 = s_8 = 1.2 \tag{(1.)}$$

$$s_{16} = s_{17} = s_{18} = 1.98 \tag{11}$$

$$v_t = (C_S \Delta)^2 \left| S \right| \tag{11}$$

در مقاله حاضر مقدار
$$C_s$$
 برابر ۱/۶ در نظر گرفته شد و همچنین $\left|S\right|$ داریم $\left|S\right|$ داریم $\left|S\right|$ داریم $\left|Y\right|$

$$\left|S_{\alpha\beta}\right| = \sqrt{2S_{\alpha\beta}S_{\alpha\beta}} = \sqrt{2[S_{xx}^{2} + S_{yy}^{2} + S_{zz}^{2} + 2(S_{xy}^{2} + S_{yz}^{2} + S_{xz}^{2})]}$$
(17)

$$S_{xx} = -\frac{1}{38\rho} [s_1 h_1^{neq} + 19s_9 h_9^{neq}]$$
(14)

$$S_{yy} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} - 3s_{11} h_{11}^{neq})]$$
 (1a)

$$S_{zz} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} + 3s_{11} h_{11}^{neq})]$$
(19)

$$S_{xy} = -\frac{3}{2\rho} s_{13} h_{13}^{neq}$$
(1Y)

$$S_{yz} = -\frac{3}{2\rho} s_{14} h_{14}^{neq}$$
(1A)

$$S_{xz} = -\frac{3}{2\rho} s_{15} h_{15}^{neq}$$
(19)

$$h_{\alpha}^{neq} = R_{\alpha} - R_{\alpha}^{eq} \tag{(1.1)}$$

در نهایت پس از محاسبه توابع توزیع سرعت، مقادیر ماکروسکوپیک سرعت و چگالی از روابط زیر بهدست میآیند:

$$\rho(x,t) = \sum_{i} f_{i}(x,t)$$

$$\rho u(x,t) = \sum_{i} f_{i}(x,t)c_{i}$$
(71)

¹ Particle relaxation time

بویانسی^۱ میباشد و در نهایت جزء آخر نیروی برونین^۲ میباشد و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۰]:

$$n_{i}(t) = \zeta_{i} \sqrt{\frac{\pi S_{1}}{\Delta t}}$$

$$S_{1} = \frac{216\nu k_{b}T}{\pi^{2}\rho d^{5}S^{2}C_{c}}$$
(79)

عدد تخمینی گوسین^۳، k_b ثابت بولتزمن و T دما بر حسب ζ_i درجه کلوین میباشد.

۵- اعتبار سنجی

در این بخش صحت حل انجام شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجایی که که نتایج عددی و آزمایشگاهی هندسه مورد بررسی در این مقاله وجود ندارد، برنامه نوشته شده در این مقاله برای هندسه بررسی شده (شکل ۳) توسط پوسنر و همکاران[†] [۳۱] در سال ۲۰۰۳ (آزمایشگاهی) و تیان وهمکاران ^۵[۳۲] در سال ۲۰۰۶ (عددی) اجرا و نتایج در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شد. همانطور که مشاهده میشود نتایج همخوانی بسیار خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی گذشته دارد و صحت حل انجام شده را تایید میکنند.



 Fig. 3. Studied geometry by Posner et al. [31] and Tian et al. [32]

 شکل ۳: هندسه بررسی شده توسط پوسنر و همکاران [۳۱] و تیان

 وهمکاران [۳۲]

- 1 Bouyancy force
- 2 Brownian force

3 Zero mean, unit variance independent Gaussian random number

- 4 Posner et al.
- 5 Tian et al.



Fig. 4. Vertical velocity along the vertical inlet jet axis شكل ۴: مؤلفه عمودی سرعت در راستای عمود بر ورودی جریان.

8- نتايج

ابتدا به منظور مشاهده خصوصیات جریان داخل اتاق، بردار سرعت در صفحهای وسط اتاق برای حالتی که دریچه در سقف و کف قرار دارد در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده میشود گردابههایی نزدیک دیوارهها و همچنین داخل اتاق به وجود آمده است که به دلیل برخورد جریان با دیوارهها و اغتشاش موجود





شکل ۵.مؤلفه عمودی سرعت در امتداد یک خط افقی در ارتفاع وسط پارتیشن از دیواره سمت چپ اتاق تا دیواره سمت راست اتاق.



.Fig. 6. Velocity vector field at Y=0.2285 plane for inlet air location at (a) ceiling and (b) floor شکل ۶: بردار سرعت در صفحه ۲۲۸۵ Y =۰/۲۲۸۵ برای حالت دریچه ورودی هوا در (الف) سقف و (ب)کف.

در جریان میباشند. این گردابهها باعث جابجایی و برخورد ذرات با یکدیگر و دیوارهها شده که پخش و ته نشینی ذرات را به دنبال خواهد داشت. همچنین تعداد این گردابهها در حالتی که دریچه در سقف قرار دارد به علت اینکه نیروی گرانش نیز در جهت جریان قرار دارد بیشتر از حالتی است که دریچه در کف قرار دارد.

برای بررسی رفتار ذرات داخل اتاق (هندسه شکل ۱)، جابجایی و نشست ذرات برای ۲ اندازه ۱ و ۱۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، بعد از اینکه جریان به حالت پایدار رسید، هر ۰/۰۵ ثانیه تعداد ۱۴۴ ذره از دریچه ورودی به داخل اتاق تزریق شد. بعد از گذشت ۳۰ ثانیه تزریق ذره متوقف شد و در کل تعداد ۰۶۴۰۰ ذره به داخل اتاق وارد گردید. در شکل ۷ تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیوارههای مختلف و همچنین تعداد کل ذرات ته نشین شده برای حالتی که دریچه ورودی جریان بالای اتاق قرار دارد برای ذرات با اندازه ۱ و ۱۰ میکرومتر نشان داده شده است. نمودار ته نشینی ذرات برای دیوارههای پشت، جلو و راست تقریبا رفتار یکسانی را نشان میدهند به طوریکه تا زمان ۳۰ ثانیه یعنی هنگامی که

اما پس از آن این تعداد تقریبا ثابت شده و تغییر چندانی مشاهده نمی شود، اگرچه تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیوارههای جلو و پشت اندکی با یکدیگر تفاوت دارد که این موضوع به دلیل ماهیت غیر تقارنی جریان مغشوش است. جریانهای مغشوش داری طیف گستردهای از گردابههای با اندازههای متفاوت است و این مقیاسهای مختلف همزمان با هم در یک جریان مغشوش وجود دارند، لذا در یک هندسهای که متقارن است به دلیل وجود گردابههای با اندازههای مختلف، جریان دارای تقارن نیست. دیوارههای چپ و بالا نیز رفتار یکسانی را نشان میدهند با توجه به محل ورود ذرات که ورودی جریان می باشد تا زمان ۲۰ ثانیه تعداد ذرات ته نشین شده بر روی این دیوارهها صفر است به این دلیل که هنوز ذرات تحت تاثیر جریان به سمت بالا و خروجي منتقل نشدهاند. همچنين با توجه به اينكه ذره با اندازه ۱۰ میکرومتر وزن بیشتری دارد، نیروی گرانش باعث می شود که این ذره کمتر به سمت بالا و خروجی منتقل شود لذا تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیوارههای چپ و بالا با اندازه ۱۰ میکرومتر کمتر از ۱ میکرومتر میباشد. در نهایت تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیواره پایین نشان میدهد که نیروی گرانش تاثیر زیادی در ته



Fig. 7. Number of deposited particles on the various walls for inlet air location on the ceiling شکل ۲: تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیوارههای مختلف برای حالت دریچه ورودی هوا در کف



Fig. 10. Number of exited particles for inlet air location on the floor شکل ۱۰: تعداد ذرات خارج شده از اتاق برای حالت دریچه در کف.

تعداد ذارت خارج شده از اتاق برای حالت دریچه در کف در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود تعداد ذرات با اندازه ۱ و ۱۰ میکرومتر برخلاف حالت دریچه در سقف تفاوت معنا داری با یکدیگر ندارند که دلیل آن ته نشینی زیاد ذرات با اندازه ۱۰ میکرومتر بر روی دیواره پایین در حالت دریچه در سقف می باشد.

۷- نتیجهگیری

در این مقاله از روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل حل ادیهای بزرگ برای حل جریان مغشوش داخل اتاق استفاده شد. به منظور بررسی تاثیر مکان سیستم تهویه مطبوع بر رفتار ریزگردها، دو موقعیت مختلف برای ورودی هوا در نظر گرفته شد و رفتار ذرات با ابعاد ۱ و ۱۰ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ذرات ته نشین شده و خارج شده از اتاق برای موقعیتهای مختلف ورودی هوا و همچنین اندازه ذرات متفاوت گزارش شد. با توجه به نتایج ارائه شده هنگامی که دریچه ورودی هوا در کف اتاق قرار دارد تعداد ذرات خارج شده از اتاق برای ذره با اندازه ۱۰ میکرومتر بیشتر از حالتی است که دریچه در سقف اتاق قرار دارد، اما برای ذره با سایز ۱ میکرومتر تعداد ذرات خروجی تقریبا یکسان است. ته نشینی ذرات با اندازه ۱۰ میکرومتر برای هر دو حالت دریچه در سقف و کف بیشتر از ذرات با اندازه ۱ میکرومتر است.





شکل ۸: تعداد ذرات خارج شده از اتاق برای حالت دریچه در سقف.

نشینی ذرات دارد به طوریکه تعداد ذرات ته نشین شده با اندازه ۱۰ میکرومتر بر روی این دیواره بسیار بیشتر از ذره با سایز ۱ میکرومتر است (بیش از ۱۰۰ برابر).

شکل ۸ تعداد ذرات خارج شده از اتاق را نشان میدهد. همانطور که قابل مشاهده است به دلیل ته نشین شدن ذرات با اندازه ۱۰ میکرومتر تعداد کمی از آنها از خروجی اتاق خارج میشوند. همچنین نرخ خروج ذره با اندازه ۱ میکرومتر با افزایش زمان بیشتر میشود.

شکل ۹ تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیواره ها را برای حالتی که دریچه ورودی هوا در کف قرار دارد نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمودارهای دیواره های جلو، عقب و راست رفتاری مشابه حالت قبلی نشان می دهند. اما در مورد دیواره بالا با توجه به اینکه جهت جریان در این حالت به سمت بالا می باشد تعداد ذرات ته نشین شده بیشتر از حالت قبلی (دریچه در سقف) است و مقدار آن در ثانیه های اول تزریق ذره صفر نیست. همچنین در مورد دیواره پایین تعداد ذرات ته نشین شده در حالتی که دریچه در سقف قرار پایین تعداد ذرات ته نشین شده در حالتی که دریچه در سقف قرار ورودی تاثیری بر میزان ته نشینی ذرات نخواهد داشت. تعداد کل فرات ته نشین شده برای حالت دریچه در کف کمتر از حالت دریچه در سقف است.



Fig. 9. Number of deposited particles on the various walls for inlet air location on the floor شکل ۹: تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیواره های مختلف برای حالت دریچه ورودی هوا در سقف.

Investigation of MHD natural convection in a porous media by double MRT lattice Boltzmann method utilizing MWCNT–Fe3O4/water hybrid nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 132 (2019) 1087–1104.

- [6]. H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, M. Atashafrooz, M. Sheikholeslami, Double MRT Lattice Boltzmann simulation of 3-D MHD natural convection in a cubic cavity with sinusoidal temperature distribution utilizing nanofluid, International Journal of Heat and Mass Transfer, 126 (2018) 489–503.
- [7]. H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, S. Jafari, Turbulent Indoor Airflow Simulation Using Hybrid LES/RANS Model Utilizing Lattice Boltzmann Method, Computers and fluids, 150 (2017) 66-73.
- [8]. I.V. Miroshnichenko, A. Sheremet, Turbulent natural convection heat transfer in rectangular enclosures using experimental and numerical approaches: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 (2018) 40-59.
- [9]. E. M. Smirnov, A. M. Levchenya, V. D. Zhukovskaya, RANS-based numerical simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 144 (2019) 118573.
- [10]. D. C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., La Canada, California (1998).
- [11]. P. Zhao, C. Wang, Z. Ge, J. Zhu, J. Liu, M. Ye, DNS of turbulent mixed convection over a vertical backward-facing step for lead-bismuth eutectic, International Journal of Heat and Mass Transfer, 127 (2018) 1215-1229.
- [12]. H. Kim, A. Dehbi, J. Kalilainen, Measurements and LES computations of a turbulent particle-laden flow inside a cubical differentially heated cavity, Atmospheric Environment, 186 (2018) 216-228.
- [13]. T.H. Hsu, P.T. Hsu, S.P. How, Mixed convection in a partially divided rectangular enclosure, Numerical Heat Transfer Part A, 31 (1997) 655–683.
- [14]. F.J. Rey, E. Velasco, Experimental study of indoor air quality, energy saving and analysis of ventilation norms in acclimatised areas, Energy and Buildings

تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاریهای بین المللی وزارت علوم و تحقیقات و فناوری انجام شده است. فهرست علائم

علائم انگلیسی

g	شتاب جاذبه زمين
Т	دما،K
t	زمان، s
f	تابع توزيع سرعت
S	نسبت چگالی ذره به سیال
d	قطر ذره
Re	عدد رينولدز
$ au_p$	زمان آرامش ذره
и	سرعت
Δt	گام زمانی
\mathcal{C}_i	سرعت ذرات در شبکه بولتزمن
k_b	ثابت بولتزمن
Δ	مقياس فيلتر
C_{c}	ضريب تصحيح كانينگهام
علائم بونانی	

 kg/m^3 چگالی، ho

v ویسکوزیته سینماتیکی مغشوش

متوسط پويش مولكولى λ

مراجع

- M. C. Sukop and D. T. Thorne Jr, Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction for Geoscientists and Engineers. Springer, Heidelberg, Berlin, New York (2006).
- [2]. S. Succi, The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond. Oxford University Press: Oxford (2001).
- [3]. H. Sajjadi, A.A. Delouei, Investigation of 3 Dimensional Nano fluid Natural Convection in Presence of Magnetic Field using Double Multi Relaxation Time Lattice Boltzmann Method, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 51 (2019) 1-14.
- [4]. M. Han, R. Ooka, H. Kikumoto, Lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation of indoor isothermal airflow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130 (2019) 700-709.
- [5]. H. Sajjadi, A. A. Delouei, M. Izadi, R. Mohebbi,

deposition in a channel with a square cylinder obstruction using the lattice Boltzmann method, Journal of Aerosol Science 41(2) (2010) 198–206.

- [25]. L. Ding, J.L.S. Fung, S. Seepana, A.C.K. Lai, Numerical study on particle dispersion and deposition in a scaled ventilated chamber using a lattice Boltzmann method, Journal of Aerosol Science 47 (2012) 1–11.
- [26]. M. Samari Kermani, S. Jafari, M. Rahnama, M. Salmanzadeh, Particle Tracking in Large Eddy Simulated Turbulent Channel Flow Using Generalized Lattice Boltzmann Method, Particulate Science and Technology 32 (2014) 404–411.
- [27]. H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, S. Jafari, Investigation of particle deposition and dispersion using Hybrid LES/RANS model based on Lattice Boltzmann method, Scientia Iranica 25 (2018) 3173-3182.
- [28]. A.Kohestani, M. Rahnama, S. Jafari, E. Jahanshahi Javaran, Non-circular particle treatment in smoothed profile method: a case study of elliptical particles sedimentation using lattice Boltzmann method, Journal of Dispersion Science and Technology, published online.
- [29]. D. d'Humieres, I. Ginzburg, M. Krafczyk, P. Lallemand, L.S.Luo, Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three-dimensions, Philosophical Transactiona A 360 (2002) 437–451.
- [30]. A. Li, G. Ahmadi, Dispersion and deposition of spherical particles form point sources in a turbulent channel flow. Aerosol Science and Technology 16 (1992) 209–226.
- [31]. J.D. Posner, C.R. Buchanan, D. Dunn-Rankin, Measurement and prediction of indoor air flow in a model room. Energy and Buildings 35 (2003) 515– 526.
- [32]. Z.F. Tian, J.Y. Tu, G.H. Yeoh, R.K.K. Yuen, On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor air flow. Building and Environment 41 (2006) 1504–1514.

33 (2000) 57–67.

- [15]. J.B. Jiang, X.L. Wang, Y.Z. Sun, Y.H. Zhang, Experimental and numerical study of airflows in a full-scale room, ASHRAE Transactions 115(2) (2009) 867–886.
- [16]. Q. Chen, K. Lee, K. Mazumdar, S. Poussou, L. Wang, M. Wang, Zhang Z., Ventilation performance prediction for buildings: Model assessment, Building and Environment 45(2) (2010) 295–303.
- [17]. M. Krafczyk, J. Tölke, L.S. Luo, Large eddy simulation with a multiple-relaxationtime LBE model. International Journal of Modern Physics B 17(1&2) (2003) 33-39.
- [18]. S. Jafari and M. Rahnama, Shear-improved Smagorinsky modeling of turbulent channel flow using generalized Lattice Boltzmann equation. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 67 (2011) 700–712.
- [19]. N. B. Wood, A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces. Journal of Aerosol Science 12 (1981) 275–290.
- [20]. P. G. Papavergos, A. B. Hedley, Particle deposition behaviour from turbulence flows. Chemical Engineering Research and Design 62 (1984) 275– 295.
- [21]. H. G. Zhang, G. Ahmadi, Aerosol particle transport and deposition in vertical and horizontal turbulent duct flows, Journal of Fluid Mechanics 406 (2000) 55–80.
- [22]. M. Salmanzadeh, M. Rahnama, G. Ahmadi, Effect of subgrid scales on large eddy simulation of particle deposition in a turbulent channel flow. Journal of Aerosol Science and Technology 44 (2010) 796– 806.
- [23]. L. Tian, G. Ahmadi, Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions. Journal of Aerosol Science, 38 (2007) 377 – 397.
- [24]. S. Jafari, M. Salmanzadeh, M. Rahnama, G. Ahmadi, Investigation of particle dispersion and

براى ارجاع به اين مقاله از عبارت زير استفاده كنيد: H. Sajjadi, G. Ahmadi, A. Amiri Delouei, Investigation of the Effect of Ventilation System Inlet Location on Particle Motion in a Room Using Multi Relaxation Time-Lattice Boltzmann Method, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 1457- 1468. DOI: 10.22060/mej.2019.16946.6481

