

تحلیل عددی ته‌نشینی ذرات داخل اتاق با استفاده از مدل ادی‌های بزرگ بر پایه روش شبکه بولتزمن*

حسن سجادی^(۱)، مازیار سلمان‌زاده^(۲)، گودرز احمدی^(۳)، سعید جعفری^(۴)

چکیده در این مقاله ته‌نشینی ذرات با اندازه‌های مختلف (۱۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر) داخل اتاق با استفاده از مدل ادی‌های بزرگ و زمان آرامش چندگانه بر پایه روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار گرفته است و اثر نیروهای بویانسی، درگ و برونین بر روی ته‌نشینی ذرات بر روی دیواره‌های مختلف اتاق اداری تحلیل شد. برای مدل کردن ادی‌های کوچک از مدل بهبودیافته اسماکورنسکی استفاده شد. برای بررسی ته‌نشینی ذرات داخل اتاق، تعداد ۱۴۴ ذره در هر بازه زمانی ۰/۰۵ ثانیه از دریچه ورودی جریان به داخل اتاق تزریق شد و بعد از گذشت ۳۰ ثانیه تزریق ذره متوقف گردید، در مجموع ۸۶۴۰۰ ذره وارد اتاق شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش عددی مورد استفاده همخوانی خوبی با روش‌های عددی و آزمایشگاهی گذشته دارد. تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره‌های مختلف اتاق بر حسب زمان محاسبه گردید و مشاهده شد که تعداد ذرات ته‌نشین شده به مرور زمان افزایش می‌یابد و ته‌نشینی ذرات با اندازه بزرگتر بیشتر می‌باشد. تراکم ذرات داخل اتاق بر حسب زمان نشان داده شد. لحظه شروع تزریق ذرات به داخل اتاق، تراکم آنها در ناحیه ورودی بیشتر می‌باشد و به مرور زمان تراکم در نواحی دور از ورودی جریان افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از این پژوهش در طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع اتاق‌های اداری و بیمارستانی کاربرد قابل توجهی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی روش شبکه بولتزمن، مدل حل ادی‌های بزرگ، پخش و ته‌نشینی ذرات، مدل بهبودیافته اسماکورنسکی.

Numerical Investigation of Particle Deposition in a Room using Large Eddy Simulation based on Lattice Boltzmann Method

H. Sajjadi M. Salmanzadeh G. Ahmadi S. Jafari

Abstract In this paper the Multi Relaxation Time Lattice Boltzmann Method in conjunction with the Large Eddy Simulation model was used to study the particle deposition in a room with various diameters (10nm-10 μ m) and the effect of buoyancy, drag and Brownian forces to particle deposition on the different walls of the room has been investigated. The sub-grid scale turbulence effects were simulated through a shear-improved Smagorinsky model. To simulate the particle deposition in the room, the particle injection process was initiated with 144 particles injected uniformly at the inlet with the same velocity as the airflow at every 0.05s; particle injection was stopped after 30s. Therefore, a total of 86400 particles were injected into the room. The present simulation results for the airflow showed good agreement with the experimental data and the earlier numerical results. The simulated results for particle dispersion and deposition showed that the numbers of deposited particles on the walls increases by augmentation of the time. When the particle injection started the concentration in the inlet jet region is more than other zones and that increases in the region far from the inlet by time. Present results will be interesting for designing air condition systems in the office and hospitals rooms.

Key Words Lattice Boltzmann Method, Large Eddy Simulation, Particle Deposition, Shear Improved Smagorinsky Model.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۸/۲۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۵/۱۳ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i2.68789

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد. h.sajjadi@ub.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه کلارکسون، امریکا.

(۴) دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان.

مقدمه

به دلیل گذراندن عمده وقت انسان‌ها در محیط داخلی ساختمان، بحث هوای داخل اتاق بسیار مهم‌تر از هوای خارج می‌باشد زیرا کیفیت هوای داخل اتاق بر سلامتی انسان‌ها تأثیرگذار است. در ساختمان‌های مدرن امروزی دستگاه‌های مختلفی برای تأمین هوای مورد نیاز اتاق‌ها استفاده می‌شود که این مسئله مقدار زیادی انرژی نیز مصرف می‌کند؛ به همین دلیل بررسی هوای داخل اتاق از نظر انرژی نیز حائز اهمیت می‌باشد. جریان داخل اتاق به دلیل این‌که شامل جریان جابه جایی آزاد، اجباری و یا هر دو می‌باشد از پیچیدگی خاصی برخوردار است [1]. بررسی آزمایشگاهی این‌گونه جریان‌ها پرهزینه می‌باشد و به همین دلیل شبیه‌سازی‌های عددی از جذابیت خاصی بین محققین برخوردار است [2].

برای حل جریان مغشوش روش‌های مختلفی ارائه شده است. یکی از روش‌هایی که امروزه بسیار مورد توجه می‌باشد مدل‌های بزرگ می‌باشد. در روش‌های بزرگ معادلات نسبت به فواصل بسیار کوچک انتگرال‌گیری می‌شود و در نتیجه اغتشاشات بسیار کوچک که مربوط به ادی‌های کوچک در جریان می‌باشد از معادلات حذف می‌گردند. معادلات به دست آمده معرف رفتار ادی‌های بزرگ در جریان می‌باشند. اثرات ادی‌های کوچک بر روی ادی‌های بزرگ از طریق مدل کردن آنها در معادلات منظور می‌گردد [3].

در دهه اخیر روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی جریان سیال مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است. برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم، روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپی و معادله جنبشی موزسکوویک استوار است [4-6] که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم، برای شبیه‌سازی مکانیک پیوسته به کار گرفته می‌شود. در روش شبکه بولتزمن، کلیه محاسبات صریح بوده و

نیاز به حل هیچ دستگاهی از معادلات نمی‌باشد. به دلیل ماهیت موضعی محاسبات، این روش به سادگی قابلیت موازی‌شدن را دارد [7]. همچنین به دلیل سهولت اعمال شرایط مرزی، برای حل مسائلی که دارای هندسه پیچیده می‌باشند کاربرد فراوانی دارد [8].

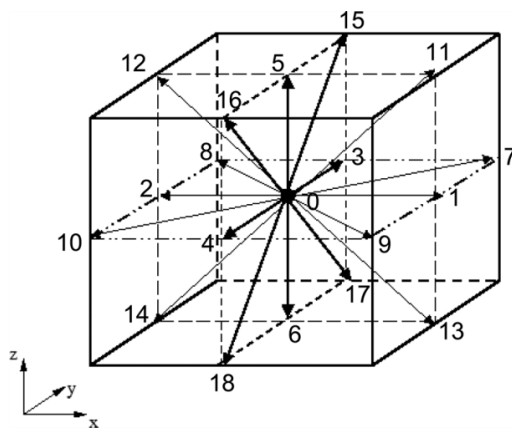
کرافزیک و همکاران در سال ۲۰۰۳ [9] جریان مغشوش را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل‌های بزرگ و زمان آرامش چندگانه تحلیل نمودند و نشان دادند که پایداری این روش بیشتر از زمان آرامش ثابت می‌باشد؛ همچنین آنها از مدل استاندارد اسماکورنسکی استفاده نمودند. پرمنات و همکاران در سال ۲۰۰۹ [10] جریان مغشوش داخلی را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل‌های بزرگ حل نمودند. آنها نیز اثر ادی‌های کوچک‌تر از شبکه را با استفاده از مدل استاندارد اسماکورنسکی لحاظ کردند. جعفری و رهنما در سال ۲۰۱۱ [7] جریان داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و ادی‌های بزرگ تحلیل کردند. آنها از مدل بهبودیافته اسماکورنسکی برای مدل‌کردن ادی‌های کوچک استفاده نمودند و نشان دادند که نتایج این مدل با نتایج حل مستقیم عددی همخوانی بهتری نسبت به مدل استاندارد اسماکورنسکی دارد.

با توجه به اهمیت بحث ته‌نشینی و انتقال ذرات در جوامع امروزی در سه دهه اخیر این موضوع مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. سلمان‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۰ [11] جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از مدل‌های بزرگ تحلیل کردند و اثر ادی‌های کوچک‌تر از شبکه را بر سرعت ته‌نشینی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که سرعت نوسانی ناشی از ادی‌های کوچک‌تر از شبکه بر ته‌نشینی ذرات کوچک تأثیر مهمی دارد ولی برای ذرات بزرگ اهمیت زیادی ندارند.

جعفری و همکاران در سال ۲۰۱۰ [12] جریان داخل یک کانال با یک مانع مربعی را با استفاده از روش

بولتزمن تابع توزیع جریان (f) ، برای به‌دست‌آوردن خواص ماکروسکوپی جریان مانند سرعت، چگالی، فشار، و ... استفاده می‌شود. در این مقاله همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است از شبکه D3Q19 استفاده گردید. بعد از گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس معادلات حاکم برای توابع توزیع جریان با زمان آرامش چندگانه به‌صورت زیر می‌باشد:

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



شکل ۱ بردارهای سرعت برای مدل D3Q19

پارامترهای موجود در معادله (۱) به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_i = \begin{cases} 0 & i=0 \\ c(\pm 1, 0, 0), c(0, \pm 1, 0), c(0, 0, \pm 1) & i=1-6 \\ c(\pm 1, \pm 1, 0), c(\pm 1, 0, \pm 1), c(0, \pm 1, \pm 1) & i=7-18 \end{cases} \quad (2)$$

که M_{ij} ماتریس تغییر شکل می‌باشد و S_{ij} ماتریس نرخ آرامش می‌باشد و به‌صورت $S_{ij} = \text{diag}(s_0, s_1, \dots, s_{18})$ در نظر گرفته می‌شود که مقادیر آنها همچنین مقادیر m_k و m_k^{eq} در مراجع [17-20] داده شده‌اند.

برای به‌دست‌آوردن v_t در این مقاله از مدل ادی‌های بزرگ و اسماکورنسکی بهبودیافته استفاده

شبکه بولتزمن تحلیل کردند. آنها ته‌نشینی و انتشار ذرات را برای این هندسه با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که روش شبکه بولتزمن میدان جریان را به‌خوبی حل کرده و رفتار ذرات به‌خوبی قابل بررسی می‌باشد. دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ [13] ته‌نشینی و انتقال ذرات داخل یک اتاق را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و زمان آرامش چندگانه مورد بررسی قرار دادند. آنها نتایج به‌دست‌آمده برای جریان ذرات با استفاده از روش شبکه بولتزمن را با نتایج نرم‌افزار فلونت مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج همخوانی خوبی دارند. ثمری و همکاران در سال ۲۰۱۴ [14] جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل بهبودیافته اسماکورنسکی حل کردند و ته‌نشینی ذرات با اندازه‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که این روش قادر است سرعت ته‌نشینی ذرات را با دقت قابل قبولی محاسبه نماید.

سجادی و همکاران [15] پخش ذرات داخل اتاق مدل‌شده‌ای را با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند ولی ته‌نشینی ذرات را تحلیل نکردند. هدف اصلی در این پژوهش بررسی چگونگی ته‌نشینی ذرات با قطرهای ۱۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر بر دیواره‌های مختلف اتاق با استفاده از روش شبکه بولتزمن بر پایه روش ادی‌های بزرگ و استفاده از مدل اسماکورنسکی بهبودیافته همچنین زمان آرامش چندگانه می‌باشد. در پژوهش حاضر اثر نیروهای مختلف از جمله نیروی گرانش، نیروی درگ و برونین بر ته‌نشینی ذرات نیز مدنظر قرار گرفت.

روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل ادی‌های بزرگ

حل عددی بر مبنای معادله بولتزمن به‌روش شبکه بولتزمن معروف است که ابتدا در سال ۱۹۸۶ توسط فریش و همکارانش [16] پیشنهاد شد. در روش شبکه

معادله حرکت ذره

معادله کلی حرکت ذرات به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i^f - u_i^p) + \left(1 - \frac{1}{S}\right) g_i + n_i(t) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) $u_i^p = \frac{dx_i}{dt}$ و جزء اول نیروی درگ می‌باشد که:

$$\tau_p = \frac{sd^2 C_c}{18\theta} \quad (14)$$

τ_p زمان آرامش ذره می‌باشد، s نسبت چگالی ذره به سیال می‌باشد و داریم:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d}{\lambda}}) \quad (15)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 1 \quad (16)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad 1 < Re_p < 400 \quad (17)$$

$$Re_p = \frac{d|u_{rel}|}{\theta} \quad u_{rel} = u_j - u_j^p \quad (18)$$

در رابطه (۱۳) جزء نیروی لیفت به دلیل ناچیز بودن حذف شده است [21,22]. جزء دوم بیانگر نیروی بویانسی می‌باشد که ناشی از گرانش زمین است. جزء آخر در رابطه (۱۳) نیروی برونین می‌باشد که برای ذرات با سایز کوچک بااهمیت بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود [23]:

$$n_i(t) = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_1}{\Delta t}} \quad (19)$$

که در این رابطه داریم: $S_1 = \frac{216\theta k_b T}{\pi^2 \rho d^5 S_0^2 C_c}$

گردید [7]. در این روش مقدار v_t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta_t = (C_s \Delta)^2 (|S_{\alpha\beta}| - |S_{\Delta}|) \quad (3)$$

در رابطه (۳) C_s ثابت اسمگورنسکی می‌باشد و برابر ۰/۱۶ در نظر گرفته شد [9]. همچنین $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ برای به دست آوردن $S_{\alpha\beta}$ داریم:

$$|S_{\alpha\beta}| = \sqrt{2S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta}} = \sqrt{2[S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2(S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{zx}^2)]} \quad (4)$$

$$S_{xx} = -\frac{1}{38\rho} [S_1 h_1^{neq} + 19S_9 h_9^{neq}] \quad (5)$$

$$S_{yy} = -\frac{1}{76\rho} [2S_1 h_1^{neq} - 19(S_9 h_9^{neq} - 3S_{11} h_{11}^{neq})] \quad (6)$$

$$S_{zz} = -\frac{1}{76\rho} [2S_1 h_1^{neq} - 19(S_9 h_9^{neq} + 3S_{11} h_{11}^{neq})] \quad (7)$$

$$S_{xy} = -\frac{3}{2\rho} S_{13} h_{13}^{neq} \quad (8)$$

$$S_{yz} = -\frac{3}{2\rho} S_{14} h_{14}^{neq} \quad (9)$$

$$S_{xz} = -\frac{3}{2\rho} S_{15} h_{15}^{neq} \quad (10)$$

$$h_{\alpha}^{neq} = m_{\alpha} - m_{\alpha}^{eq} + \frac{1}{2} S_{\alpha} \quad (11)$$

در نهایت مقادیر ماکروسکوپی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (12)$$

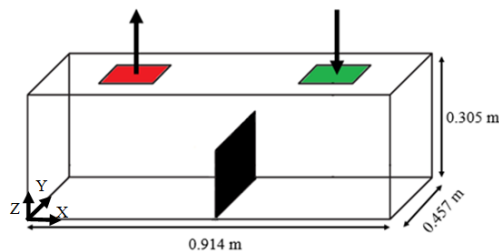
$$\rho u(x, t) = \sum_i f_i(x, t) C_i$$

نتایج

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \quad (22)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + Pr \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (23)$$



شکل ۲ هندسه اتاق مورد بررسی

جریان. با توجه به این موضوع که حل جریان داخل یک اتاق با اندازه واقعی نیازمند صرف زمان و هزینه بسیار بالا می باشد، معمولاً برای حل آزمایشگاهی با توجه به تحلیل ابعادی از هندسه های کوچکتر استفاده می شود. در این قسمت نیز هندسه مدل شده یک اتاق با نسبت ابعادی $\frac{1}{10}$ که دارای یک ورودی و خروجی بر روی سقف و همچنین یک پارتیشن به ارتفاع نصف ارتفاع اتاق در وسط آن می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی و عددی این هندسه به ترتیب توسط پوسنر و همکاران در سال ۲۰۰۳ [24] و تیان و همکاران در سال ۲۰۰۶ [25] ارائه شده است. ابعاد هندسه مورد بررسی همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، به ترتیب برابر 0.914 ، 0.457 و 0.305 متر در راستای X ، Z و Y می باشد. جریان هوا به صورت عمودی از دریچه ورودی در سقف وارد اتاق شده و از دریچه خروجی خارج می شود. ابعاد دریچه ورودی و خروجی یکسان و برابر 0.101×0.101 متر می باشد. عدد رینولدز جریان بر پایه طول دریچه ورودی و سرعت جریان ورودی برابر با 1628 و چگالی هوا برابر $1/18$ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سیال برابر $1/48 \times 10^{-5}$ مترمربع بر ثانیه می باشد.

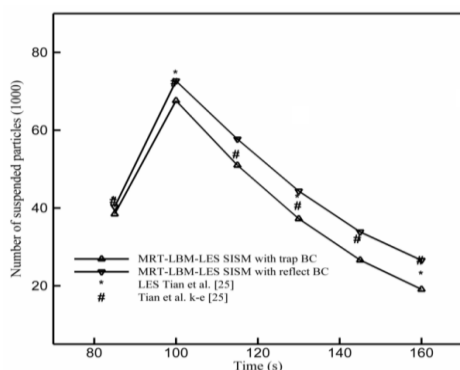
در پژوهش حاضر شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره های اتاق و پارتیشن در نظر گرفته شد، همچنین شرط مرزی ورودی سرعت برای دریچه ورودی و فشار ثابت برای دریچه خروجی استفاده شد. معادلات کلی حاکم بر مسئله در حالت بی بعد به صورت زیر می باشند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (20)$$

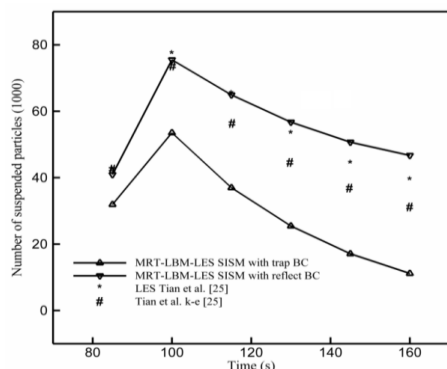
مقایسه نتایج به دست آمده از حل مدل LES بر پایه روش شبکه بولتزمن برای سرعت عمودی در امتداد یک خط عمود از وسط دریچه ورودی تا کف اتاق با نتایج آزمایشگاهی و عددی گذشته در شکل (۴) مرجع [18] توسط نویسندگان حاضر انجام شده است و نشان داده شد که نتایج مدل مورد استفاده در این مقاله با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی دارد و بهتر از روش های عددی گذشته می باشد. همچنین در شکل (۵) مرجع [15] مقایسه سرعت عمودی در امتداد محور افقی در ارتفاع وسط پارتیشن از دیواره سمت چپ تا دیواره سمت راست انجام شد که نتایج به دست آمده همخوانی قابل قبولی را با نتایج آزمایشگاهی نشان داد.

یکی از مزیت های مهم مدل ادی های بزرگ توانایی این مدل در پیش بینی سرعت نوسانی و لحظه ای جریان می باشد. به منظور بررسی درستی حل حاضر در به دست آوردن سرعت لحظه ای، مقدار سرعت RMS در صفحه ای در وسط اتاق با حل عددی

بزرگ گذشته [25] در زمان کمتر از ۱۲۰ ثانیه حدود ۳٪، در زمان ۱۳۰ ثانیه ۴/۴٪، در زمان ۱۴۵ ثانیه ۷٪ و در زمان ۱۶۰ ثانیه برابر ۱۶/۹٪ می‌باشد. همچنین برای اندازه ۱۰ میکرومتر در زمان کمتر از ۱۲۰ ثانیه حدود ۴٪، در زمان ۱۳۰ ثانیه ۶/۷٪، در زمان ۱۴۵ ثانیه ۱۵٪ و در زمان ۱۶۰ ثانیه برابر ۱۷/۵٪ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان تا ۱۰۰ ثانیه، لحظه‌ای که تزریق ذره متوقف می‌شود، تعداد ذرات داخل اتاق افزایش می‌یابد. بعد از لحظه ۱۰۰ ثانیه باتوجه به این که دیگر ذره‌ای به داخل اتاق وارد نمی‌شود و ذرات موجود نیز از خروجی جریان خارج می‌شوند، تعداد ذرات داخل اتاق کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند هنگامی که شرط مرزی نشست اعمال شود تعداد ذرات معلق در هوا به دلیل ته‌نشینی آنها و عدم بازگشت به محیط کاهش می‌یابد (شکل‌های ۶-۳).



شکل ۳ مقایسه تعداد ذرات معلق داخل اتاق نسبت به زمان برای ذره با اندازه ۱ میکرومتر با کار عددی مرجع [25]



شکل ۴ مقایسه تعداد ذرات معلق داخل اتاق نسبت به زمان برای ذره با اندازه ۱۰ میکرومتر با کار عددی مرجع [25]

گذشته در شکل (۶) مرجع [15] مقایسه و نشان داده شد که روش مورد استفاده در این مقاله به خوبی قادر به پیش‌بینی سرعت نوسانی می‌باشد.

پخش و ته‌نشینی ذرات. برای بررسی رفتار ذرات داخل اتاق (هندسه شکل ۲)، جابه‌جایی و نشست ذرات برای ۴ اندازه مختلف (۱۰ و ۱۰۰ نانومتر، ۱۰ میکرومتر) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور، بعد از گذشت ۷۰ ثانیه از ورود جریان به داخل اتاق، هر ۰/۰۵ ثانیه تعداد ذره از دریچه ورودی به داخل اتاق تزریق شد. بعد از گذشت ۳۰ ثانیه تزریق ذره متوقف شد و در کل تعداد ۸۶۴۰۰ ذره به داخل اتاق وارد گردید. چگالی ذرات برابر ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. نتایج این قسمت با نتایج عددی ارائه شده توسط تیان و همکاران [25] مقایسه شده است؛ البته قابل ذکر می‌باشد که آنها نتایج رفتار ذرات را فقط برای اندازه ۱ و ۱۰ میکرومتر ارائه کردند ولی از آنجایی که در این مقاله اثر نیروی برونین نیز لحاظ شده است و نیاز به بررسی ذره‌ها با اندازه کوچکتر نیز می‌باشد و نتایجی برای این اندازه ذره در گذشته گزارش نشده است، برای اندازه‌های ۱۰ و ۱۰۰ نانومتر مقایسه‌ای انجام نشده است. تیان و همکاران [25] شرط مرزی بازتاب را برای ذراتی که با دیواره برخورد می‌کنند در نظر گرفتند، به همین دلیل در این مقاله به منظور مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج آنها این شرط مرزی لحاظ گردید؛ اما از آنجایی که برای ذرات با اندازه کوچک شرط مرزی بازتاب از لحاظ فیزیکی درست نمی‌باشد، شرط مرزی نشست نیز برای ذرات مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل‌های (۶-۳) تعداد ذرات معلق در اتاق در زمان‌های مختلف و اندازه‌های متفاوت با استفاده از جریان به دست آمده از مدل‌های بزرگ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد نتایج همخوانی قابل قبولی با حل عددی گذشته دارد به طوری که مقدار خطای نتایج به دست آمده برای اندازه ۱ میکرومتر نسبت به نتایج حاصل از مدل‌های

۱۰ میکرومتر در ناحیه فشرده‌گی اینرسی قرار دارد و در این ناحیه ته‌نشینی ذرات زیاد می‌باشد و تعداد ذرات بیشتری بر روی دیواره‌ها رسوب می‌کنند، در نتیجه تعداد ذرات معلق کاهش زیادی خواهد داشت.

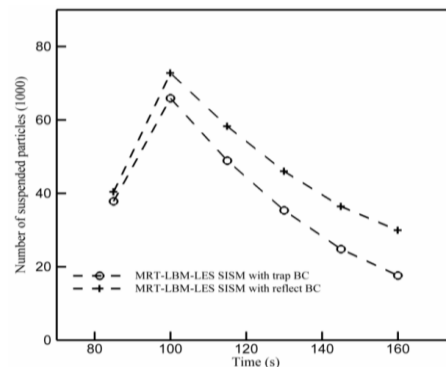
برای به‌دست آوردن تراکم میانگین ذرات داخل اتاق از مدل هاردالوپاس و تیلور [26] که توسط ژو و همکاران [27] گزارش شده است استفاده شد. در این روش تراکم میانگین براساس نسبت مدت زمان حضور ذره در موقعیت خاص به زمان کل نمونه‌برداری محاسبه خواهد شد. بر این اساس داریم [28]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{VT} \quad (24)$$

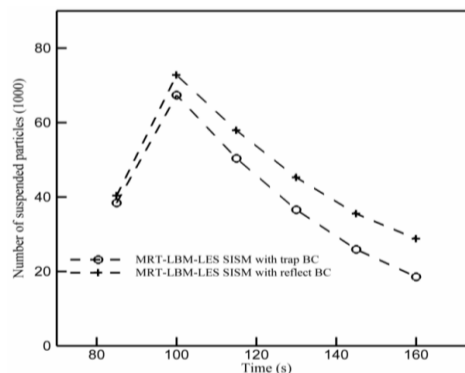
در رابطه بالا n تعداد ذراتی است که از شبکه به حجم V عبور کرده‌اند و t_i مدت زمان حضور ذرات در شبکه مورد بررسی در طول زمان نمونه‌برداری T می‌باشد. علاوه بر این برای محاسبه تراکم ذرات از یک شبکه‌بندی جداگانه که با شبکه‌بندی مورد استفاده برای تحلیل رفتار ذره متفاوت بود استفاده شد. در نهایت تراکم ذرات در ورودی جریان برای بی‌بعدکردن تراکم محاسبه‌شده استفاده گردید و رابطه مورد استفاده به صورت زیر می‌باشد:

$$C^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i / V}{(N / A_{in} v_{in})} \quad (25)$$

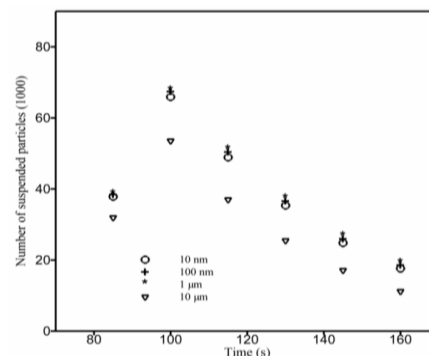
در رابطه (25) N تعداد ذرات تزیق‌شده با سرعت v_{in} در ناحیه ورودی به مساحت A_{in} می‌باشد. در لحظه ۱۰۰ ثانیه، هنگامی که تزیق ذره متوقف می‌شود، شکل (۸) تراکم ذره با اندازه ۱ میکرومتر را نشان می‌دهد. در این لحظه بیشترین تراکم ذره در ناحیه ورودی جریان و سمت راست اتاق می‌باشد و هنوز ذرات زیادی به سمت چپ اتاق وارد نشده‌اند.



شکل ۵ تعداد ذرات معلق داخل اتاق نسبت به زمان برای ذره با اندازه ۱۰ نانومتر



شکل ۶ تعداد ذرات معلق داخل اتاق نسبت به زمان برای ذره با اندازه ۱۰۰ نانومتر

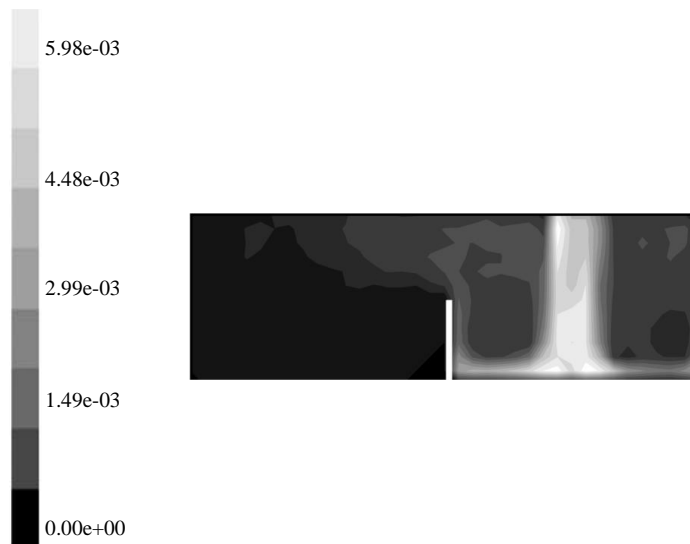


شکل ۷ مقایسه تعداد ذرات معلق داخل اتاق نسبت به زمان برای اندازه‌های مختلف ذره

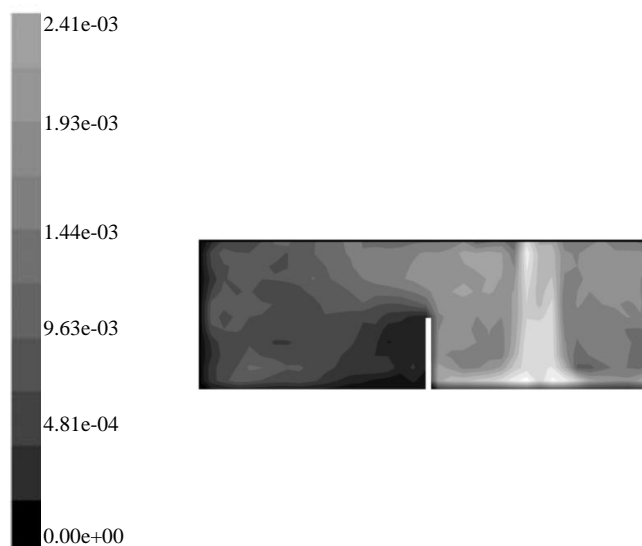
تعداد ذرات داخل اتاق برای اندازه‌های مختلف به‌منظور مقایسه آنها در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که نشان داده شده است تعداد ذرات معلق در فضای اتاق برای اندازه ۱ میکرومتر بیشترین مقدار و برای ۱۰ میکرومتر کمترین مقدار می‌باشد، زیرا ذره با اندازه

به حرکت به سمت خروجی جریان نمی‌باشند و بیشتر آنها به سمت دیواره حرکت می‌کنند، بنابراین مطابق نتایج پیش‌بینی‌شده در شکل (۹)، تراکم ذرات در نواحی نزدیک دیواره‌ها بیشتر می‌باشد.

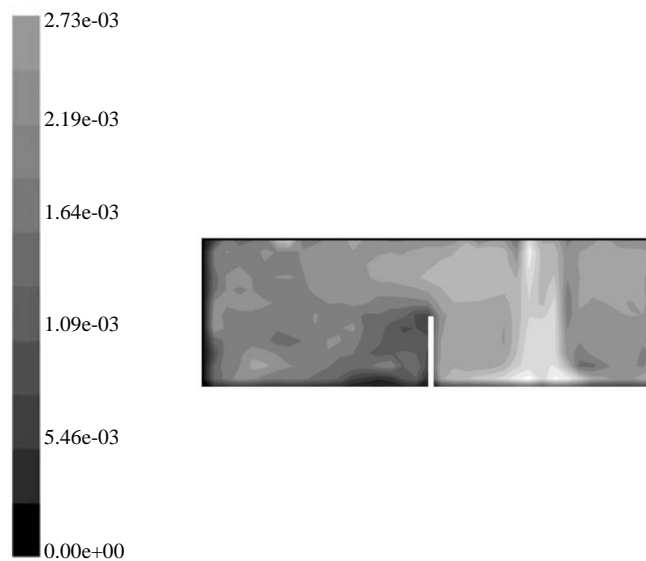
تراکم ذرات در لحظه ۱۳۰ ثانیه، ۳۰ ثانیه بعد از توقف تزریق ذره، در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد تعداد زیادی از ذرات به سمت چپ اتاق وارد شده‌اند و از طرفی، به دلیل سرعت کم جریان در این قسمت از اتاق، ذرات قادر



شکل ۸ تراکم ذرات در لحظه ۱۰۰ ثانیه برای ذره با سایز ۱ میکرومتر



شکل ۹ تراکم ذرات در لحظه ۱۳۰ ثانیه برای ذره با سایز ۱ میکرومتر



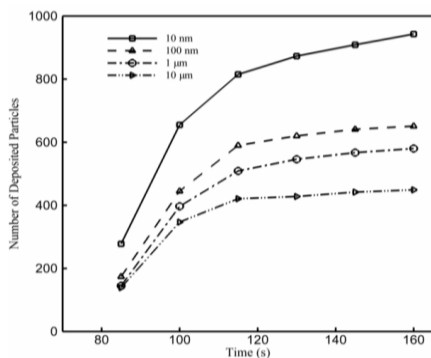
شکل ۱۰ تراکم ذرات در لحظه ۱۶۰ ثانیه برای ذره با سایز ۱ میکرومتر

بیشتر از ۱۰۰ نانومتر و ۱ میکرومتر می‌باشد. به دلیل این‌که بعد از زمان ۱۲۰ ثانیه اکثر ذرات به سمت خروجی و چپ اتاق می‌روند شیب نمودار در شکل (۱۱-ج) بعد از این زمان تقریباً ثابت می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱۱-د) دیده می‌شود تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره سمت چپ در زمان ۸۵ ثانیه تقریباً صفر می‌باشد، زیرا هنوز ذره‌ای به این ناحیه وارد نشده است. از طرفی ذرات با اندازه کوچکتر بیشتر به این سمت اتاق وارد می‌شوند؛ در نتیجه تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره چپ برای ذرات با اندازه کوچکتر بیشتر می‌باشد. تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره جلو، عقب و پارتیشن به ترتیب در شکل (۱۱-ذ، ر و ز) نمایش داده شده است. شیب نمودار بعد از زمان ۱۲۰ ثانیه برای این دیواره‌ها تقریباً ثابت می‌باشد.

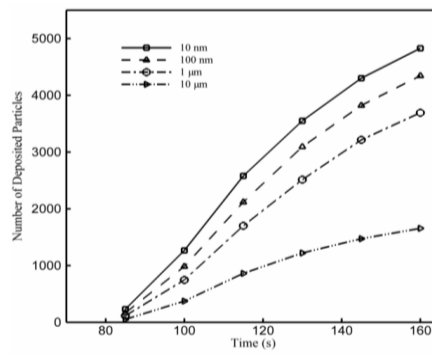
شکل (۱۱-ث) نشان می‌دهد که تعداد کل ذرات ته‌نشین شده برای اندازه ۱۰ میکرومتر بیشتر از بقیه می‌باشد و همچنین برای اندازه ۱۰ نانومتر به علت وجود نیروی برونین بیشتر از ۱۰۰ نانومتر و ۱ میکرومتر می‌باشد.

به‌طور مشابه شکل (۱۰) تراکم ذرات را در زمان ۱۶۰ ثانیه، ۶۰ ثانیه بعد از توقف تزریق ذرات، نشان می‌دهد. تعداد ذرات در سمت چپ افزایش یافته است و همان‌طور که ذکر گردید به علت سرعت کم ذرات در این ناحیه بیشتر آنها در اتاق باقی می‌مانند و قادر نخواهند بود از خروجی اتاق خارج شوند.

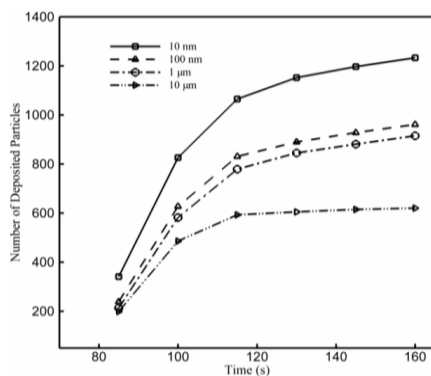
شکل (۱۱) تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۱-الف) دیده می‌شود تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی سقف اتاق به صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد زیرا بعد از تزریق ذره، ذرات به سمت بالا و خروجی جریان حرکت می‌کنند که در این مسیر بر روی سقف اتاق ته‌نشین می‌شوند، همچنین ذرات کوچکتر بیشتر بر روی سقف ته‌نشین می‌شوند. تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی کف اتاق در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است. تعداد ذرات ته‌نشین شده تا زمان ۱۰۰ ثانیه به شدت افزایش می‌یابد ولی بعد از توقف تزریق ذره این افزایش کمتر شده و شیب نمودار کاهش می‌یابد. علاوه بر آن به دلیل نیروی برونین تعداد ذرات ته‌نشین شده برای ذره با اندازه ۱۰ نانومتر



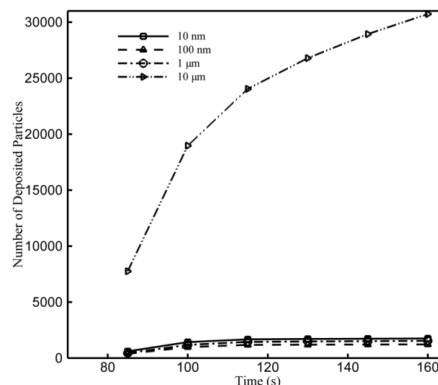
Front(ذ)



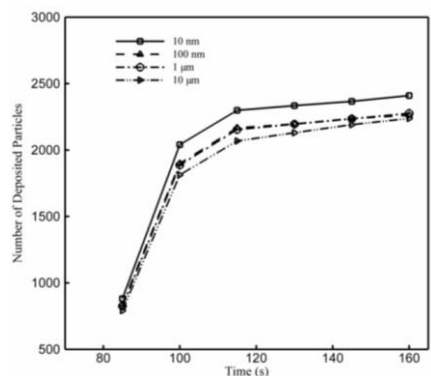
Top(ف)



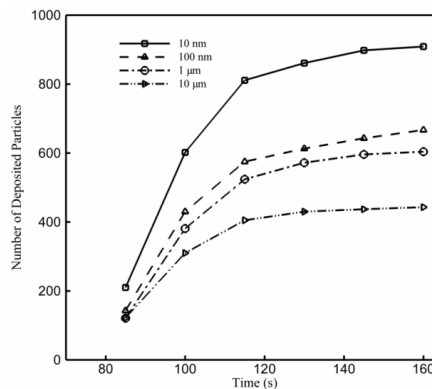
Behind(ر)



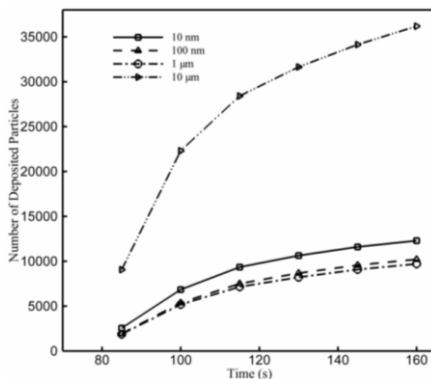
Bottom(ب)



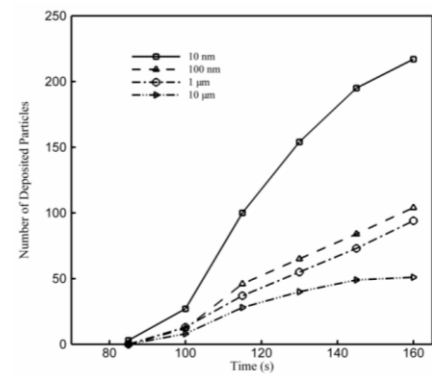
Partition(ز)



Right(ج)



Total(ث)



Left(د)

شکل ۱۱ تعداد ذرات ته‌نشین شده بر روی دیواره‌های اتاق

نتیجه‌گیری

- با استفاده از شرط مرزی نشست تعداد ذرات معلق در هوا به دلیل رسوب ذرات بر روی دیواره‌های اتاق کاهش یافت.
- به دلیل وجود نیروی گرانش تعداد ذرات ته‌نشین شده بر کف اتاق بیشتر از سایر دیواره‌ها می‌باشد.

پخش و ته‌نشینی ذرات داخل اتاق با استفاده از روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل ادی‌های بزرگ و مدل بهبودیافته اسماغورنسکی همچنین زمان آرامش چندگانه مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به نتایج، موارد زیر حاصل گردید:

- روش مورد استفاده در این مقاله روش مناسبی برای بررسی پخش و ته‌نشینی ذرات داخل اتاق می‌باشد.
- تعداد کل ذرات ته‌نشین شده در اتاق برای ذره با قطر ۱۰ میکرومتر بیشتر از سایر اندازه‌ها می‌باشد و به دلیل کاهش نیروی برونین با افزایش سایز، برای قطر ۱۰ نانومتر بیشتر از ۱۰۰ نانومتر و ۱ میکرومتر است.
- شیب نمودار ته‌نشینی ذرات بعد از توقف تزریق ذره تقریباً ثابت شد.

واژه‌نامه

Inertia impaction	اینرسی
Reflect	بازتاب
Computational Fluid Dynamic (CFD)	دینامیک سیالات محاسباتی
Lattice Boltzmann Method (LBM)	روش شبکه بولتزمن
Sub-grid scale	کوچک‌تر از شبکه
Mesosopic	مزوسکوپی
Trap	نشست

مراجع

1. Sajjadi, H., Salmanzadeh, M., Ahmadi, G. and Jafari, S., "Combination of Lattice Boltzmann Method and RANS Approach for Simulation of Turbulent Flows and Particle Transport and Deposition", *Particuology*, Vol. 30, pp. 62-72, (2017).
2. Jiang, J.B., Wang, X.L., Sun, Y.Z. and Zhang, Y.H., "Experimental and numerical study of airflows in a full-scale room", *ASHRAE Transactions*, Vol. 115, pp. 867-886, (2009).
3. Smagorinsky, J., "General circulation experiment with the primitive equations", *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164, (1963).
4. Sukop, M. C. and Thorne Jr, D. T., "Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction for Geoscientists and Engineers", New York, Springer, (2006).
5. Succi, S., "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond", Oxford University Press: Oxford, (2001).
6. Sajjadi, H., Salmanzadeh, M., Ahmadi, G. and Jafari, S., "Turbulent Indoor Airflow Simulation Using Hybrid LES/RANS Model Utilizing Lattice Boltzmann Method", *Computers and fluids*, Vol. 150, pp. 66-73, (2017).
7. Jafari, S. and Rahnama, M., "Shear-improved Smagorinsky modeling of turbulent channel flow using generalized Lattice Boltzmann equation", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 67, pp. 700-712, (2011).
8. Sajjadi, H., Gorji, M., Kefayati, G.H.R. and Ganji, D.D., "Lattice Boltzmann Simulation of Turbulent Natural Convection in Tall Enclosures Using Cu/Water Nanofluid", *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 62, pp. 512-530, (2012).
9. Krafczyk, M., Tölke, J., Luo, L.S., "Large eddy simulation with a multiple-relaxationtime LBE model", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17, pp. 33-39, (2003).

10. Premnath, K. N., Pattison, M.J. and Banerjee, S., "Generalized Lattice Boltzmann equation with forcing term for computation of wall bounded turbulent flows", *Physical Review E*, Vol. 79, pp. 026703-1–026703-19, (2009).
11. Salmanzadeh, M., Rahnama, M. and Ahmadi, G., "Effect of subgrid scales on large eddy simulation of particle deposition in a turbulent channel flow", *Journal of Aerosol Science and Technology*, Vol. 44, pp.796–806, (2010).
12. Jafari, S., Salmanzadeh, M., Rahnama, M. and Ahmadi, G., "Investigation of particle dispersion and deposition in a channel with a square cylinder obstruction using the lattice Boltzmann method", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 41, pp. 198–206, (2010).
13. Ding, L., Fung, J.L.S., Seepana, S. and Lai, A.C.K., "Numerical study on particle dispersion and deposition in a scaled ventilated chamber using a lattice Boltzmann method", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 47, pp. 1–11, (2012).
14. Samari Kermani, M., Jafari, S., Rahnama, M. and Salmanzadeh, M., "Particle Tracking in Large Eddy Simulated Turbulent Channel Flow Using Generalized Lattice Boltzmann Method", *Particulate Science and Technology*, Vol. 32, pp. 404–411, (2014).
15. Sajjadi, H., Salmanzadeh, M., Ahmadi, G. and Jafari, S., "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).
16. Frisch, U., Hasslacher, B. and Pomeau, Y., "Lattice-Gas Automata For Navier-Stokes Equation", *Physics Review Letter*, Vol. 56, pp. 1505-1508, (1986).
17. d'Humières, D., Ginzburg, I., Krafczyk, M., Lallemand, P. and Luo, L.S., "Multiple-relaxation-time Lattice Boltzmann models in three dimensions", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 360, pp. 437–452, (2002).
18. Yu, H., Luo, L.S. and Girimaji, S., "LES of turbulent square jet flow using an MRT Lattice Boltzmann model", *Computers and Fluids*, Vol. 35, pp. 957–965, (2006).
19. Pattison, M.J., Premnath, K.N. and Banerjee, S., "Computation of turbulent flow and secondary motions in a square duct using a forced generalized Lattice Boltzmann equation", *Physical Review E*, Vol. 79, pp. 026704-1–026704-13, (2009).
20. Premnath, K. N., Pattison, M. J. and Banerjee, S., "Dynamic subgrid scale modeling of turbulent flows using Lattice– Boltzmann method", *Physica A*, Vol. 388, pp. 2640–2658, (2009).
21. Tian, L. and Ahmadi, G., "Particle deposition in turbulent duct flows comparisons of different model predictions", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, pp. 377–397, (2007).
22. Zhang, H. and Ahmadi, G., "Aerosol particle transport and deposition in vertical and horizontal turbulent duct flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 406, pp. 55–80, (2000).
23. Li, A. and Ahmadi, G., "Deposition of aerosols on surfaces in a turbulent channel flow", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 31, pp.435–451, (1993).
24. Posner, J.D., Buchanan, C.R. and Dunn-Rankin, D., "Measurement and prediction of indoor air flow in a model room", *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 515–526, (2003).
25. Tian, Z.F., Tu, J.Y., Yeoh, G.H. and Yuen R.K.K., "On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor air flow", *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1504–1514, (2006).
26. Hardalupas, Y. and Taylor, A., "On the measurement of particle concentration near a stagnation point", *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 113–118, (1998).
27. Zhu, J., Rudoff, R., Bachalo, E. and Bachalo, W.N., "Number density and mass flux measurements using the phase Doppler particle analyzer in reacting and non-reacting swirling flows", In: AIAA, Aerospace sciences meeting, (1993).
28. Salmanzadeh, M., Zahedi, Gh., Ahmadi, G., Marr, D.R. and Glauser, M., "Computational modeling of effects of thermal plume adjacent to the body on the indoor airflow and particle transport", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 53, pp. 29–39, (2012).