



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

حسن سجادی<sup>۱\*</sup>، گودرز احمدی<sup>۲</sup>، امین امیری دلوثی<sup>۱</sup>

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲  
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۱۵  
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵

### کلمات کلیدی:

روش شبکه بولتزمن  
مدل زمان آرامش چندگانه  
ته نشینی ذرات  
مدل حل ادی‌های بزرگ

**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 ۰/۳۰۵×۰/۴۵۷×۰/۹۱۴ متر انتخاب شده و دو موقعیت مختلف (سقف و کف) برای دریچه ورودی هوا با ابعاد ۰/۱×۰/۱×۰/۱ متر در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه جریان داخل اتاق مغشوش است از مدل حل ادی‌های بزرگ همراه مدل استاندارد اسمانگورنسکی 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 اندازه‌های 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.

### 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 به دست آوردن راه حل‌هایی هستند که علاوه بر دقت بالا، زمان محاسباتی پائینی داشته باشند.

در دهه اخیر روش شبکه بولتزمن<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> مرسوم، روش شبکه

بولتزمن بر پایه مدل میکروسکوپی و معادله جنبشی مزوسکوپی<sup>۳</sup> استوار است که مجموعه رفتار ذرات در یک سیستم، برای شبیه‌سازی مکانیک پیوسته به کار گرفته می‌شود [۱-۳]. در روش شبکه بولتزمن، کلیه محاسبات صریح بوده و نیاز به حل هیچ دستگامی از معادلات نیست. به دلیل ماهیت موضعی محاسبات، این روش به سادگی قابلیت موازی شدن را دارد [۴]. هان و همکاران<sup>۴</sup> [۴] نشان دادند 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 می‌توان به شبیه‌سازی 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 [۵-۷].

- 1 Lattice Boltzmann Method
- 2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

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

- 3 Mesoscopic
- 4 Han et al.



می‌گیرد که می‌تواند رژیم جریان آرام، گذار و یا مغشوش را ایجاد کند. بررسی آزمایشگاهی این گونه جریان‌ها پرهزینه است به همین دلیل شبیه‌سازی‌های عددی از جذابیت خاصی بین محققین برخوردار می‌باشد [۱۶-۱۴].

کرافزیک و همکاران<sup>۴</sup> [۱۷] در سال ۲۰۰۳ جریان مغشوش را با استفاده از روش شبکه بولترمن، مدل ادی‌های بزرگ و اسمانگورنسکی استاندارد و زمان آرامش چندگانه تحلیل نمودند، آن‌ها نشان دادند که پایداری این روش بیشتر از زمان آرامش ثابت است. جعفری و رهنما<sup>۵</sup> [۱۸] در سال ۲۰۱۱ جریان داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولترمن و مدل حل ادی‌های بزرگ تحلیل کردند. آن‌ها از مدل بهبود یافته اسمانگورنسکی 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<sup>۶</sup> [۱۹] در سال ۱۹۸۱ با استفاده از روش تحلیلی، سرعت نشست ذرات را برای سطوح صاف و ناهموار به دست آورد. او نشان داد که این روش برای سطوح صاف نتایج قابل قبولی می‌دهد اما برای سطوح ناهموار نتایج دقت بالایی ندارند. پاپاورگوس و هیدلی<sup>۷</sup> [۲۰] در سال ۱۹۸۴ نتایج آزمایشگاهی مربوط به نشست ذرات در کانال را ارائه کردند. ژانگ و احمدی<sup>۸</sup> [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<sup>۹</sup> [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

با توجه به خصوصیات جریان‌های مغشوش و دقت به این موضوع که اکثر جریان‌های 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 پیچیده علوم فیزیک می‌باشد. برای حل جریان مغشوش مدل‌های مختلفی ارائه شده است که هر کدام برای رژیم‌های خاص جریان و حتی در ناحیه خاصی از جریان معتبر می‌باشند. یکی از روش‌های متداول در مسایل مهندسی برای حل جریان مغشوش روش معادلات متوسط‌گیری شده نایر استوکس<sup>۱</sup> است که به علت زمان محاسباتی کم مورد توجه بسیاری از مهندسين قرار گرفته است [۹ و ۱۰]. ولی با توجه به اینکه این روش فقط نتایج متوسط‌گیری شده را ارائه می‌دهد و قادر به حل اغتشاش موجود در جریان مغشوش نمی‌باشد، در تحلیل رفتار ذرات که سرعت‌های نوسانی نقش بسیار مهمی دارند، دقت کمی دارد. در مقابل روش معادلات متوسط‌گیری شده نایر استوکس روش حل مستقیم عددی<sup>۲</sup> قرار دارد که تمام جریان را به صورت مستقیم و بدون استفاده از هیچ مدلی حل می‌کند [۱۱]. مشکل روش حل مستقیم عددی زمان محاسباتی بالای مورد نیاز است، به همین دلیل مهندسين و دانشمندان علاقه زیادی به استفاده از این روش ندارند. روش دیگری که در واقع روشی است بین معادلات متوسط‌گیری شده و حل مستقیم عددی، شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ<sup>۳</sup> می‌باشد [۱۲]. در این روش ادی‌های بزرگ به صورت مستقیم حل می‌شوند و ادی‌های کوچکتر از پارامتر فیلتر، مدل می‌شوند.

از آنجا که وقت عمده انسان‌ها در محیط داخل اتاق می‌گذرد بحث هوای داخل اتاق بسیار مهم‌تر 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 می‌شود این سیستم‌ها مقدار زیادی انرژی نیز مصرف می‌کنند 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 می‌باشد از پیچیدگی خاصی برخوردار است [۱۳]. جریان داخل اتاق اغلب برای اعداد رینولدز پایین مورد بررسی قرار

4 Krafczyk et al.

5 Jafari et al.

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)

مغشوش و رفتار ذرات را به خوبی دارد. کوهستانی و همکاران<sup>۶</sup> [۲۸] در سال ۲۰۱۹ به نشینی ذرات غیر دایره‌ای را با استفاده از ترکیب روش شبکه بولتزمن و پروفایل مسطح<sup>۷</sup> 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 ۰/۱ 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 معمولاً 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 می‌گیرند. در این مقاله یک اتاق با نسبت ابعادی ۰/۱ 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 ۰/۹۱۴×۰/۴۵۷×۰/۳۰۵ متر است. دو موقعیت مختلف برای هوای ورودی در نظر گرفته شده است به طوریکه جریان هوا به صورت عمودی از دریچه ورودی در سقف یا کف وارد اتاق شده و از دریچه خروجی واقع در سقف خارج می‌شود. ابعاد دریچه ورودی و خروجی یکسان و برابر ۰/۱۰۱×۰/۱۰۱ متر می‌باشد (ابعاد واقعی ۱۰۱×۱۰۱ سانتی‌متر است). عدد رینولدز جریان بر پایه طول دریچه ورودی و سرعت جریان ورودی برابر با ۱۵۰۰، چگالی هوا برابر ۱/۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته

دارد ولی برای ذرات بزرگ اهمیت زیادی ندارند. تیان و احمدی<sup>۱</sup> [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 به دست آوردن سرعت نوسانی از مدل گسسته سازی تصادفی<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> [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 شبکه بولتزمن را با نتایج نرم افزار فلونت مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج همخوانی خوبی دارند. سمری کرمانی و همکاران<sup>۴</sup> [۲۶] در سال ۲۰۱۴ جریان مغشوش داخل کانال را با استفاده از روش شبکه بولتزمن و مدل بهبود یافته اسمگورنسکی 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<sup>۵</sup> [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

- 1 Tian and Ahmadi
- 2 Discret Random Walk
- 3 Ding et al.
- 4 Samari et al.
- 5 Sajjadi et al.

6 Kohestani et al.

7 Smoothed profile method



#### ۴- معادله حرکت ذره

معادله کلی حرکت ذرات به صورت زیر است [۳۰]:

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D Re_p}{24} (u_i - u_i^p) + \left(1 - \frac{1}{S}\right) g_i + n_i(t) \quad (22)$$

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 جزء اول در سمت راست رابطه (۲۲) نیروی پسا بر واحد جرم ذره می‌باشد که برای آن داریم [۳۰]:

$$\tau_p = \frac{S d^2 C_c}{18 \nu} \quad (23)$$

$\tau_p$  زمان آرامش ذره<sup>۱</sup> می‌باشد،  $S$  نسبت چگالی ذره به سیال است و  $C_c$  ضریب تصحیح کانینگهام و برابر است با [۳۰]:

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d}{\lambda}}) \quad (24)$$

$d$  قطر ذره و  $\lambda$  متوسط پویش آزاد مولکولی و مقدار آن برابر است با  $10^{-8} \cdot \nu$ .  $C_D$  ضریب پسا می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۰]:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 1 \quad (25)$$

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

که  $Re_p$  معرف عدد رینولدز ذره می‌باشد و داریم

$$Re_p = \frac{d |u_{rel}|}{\nu} \quad u_{rel} = u_j - u_j^p$$

جزء دوم در سمت راست رابطه (۲۲) اثر نیروی جاذبه و نیروی

$$s_2 = s_{10} = s_{12} = 1.4 \quad (9)$$

$$s_4 = s_6 = s_8 = 1.2 \quad (10)$$

$$s_{16} = s_{17} = s_{18} = 1.98 \quad (11)$$

برای محاسبه  $\nu_i$  در این مقاله از مدل اسماگورنسکی استاندارد استفاده گردید که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$\nu_i = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (12)$$

در مقاله حاضر مقدار  $C_s$  برابر ۰/۱۶ در نظر گرفته شد و همچنین برای بدست آوردن مقدار  $|S|$  داریم [۷]:

$$|S_{\alpha\beta}| = \sqrt{2 S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta}} = \sqrt{2[S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2(S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{xz}^2)]} \quad (13)$$

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

$$S_{yy} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} - 3s_{11} h_{11}^{neq})] \quad (15)$$

$$S_{zz} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} + 3s_{11} h_{11}^{neq})] \quad (16)$$

$$S_{xy} = -\frac{3}{2\rho} s_{13} h_{13}^{neq} \quad (17)$$

$$S_{yz} = -\frac{3}{2\rho} s_{14} h_{14}^{neq} \quad (18)$$

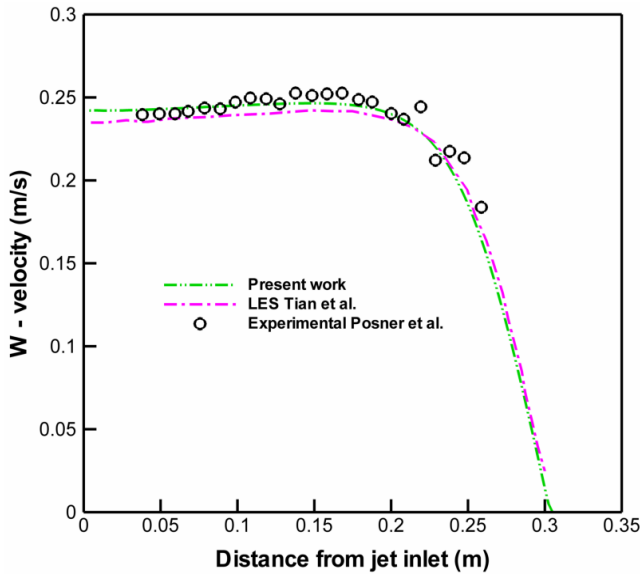
$$S_{xz} = -\frac{3}{2\rho} s_{15} h_{15}^{neq} \quad (19)$$

$$h_{\alpha}^{neq} = R_{\alpha} - R_{\alpha}^{eq} \quad (20)$$

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

$$\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \quad (21)$$

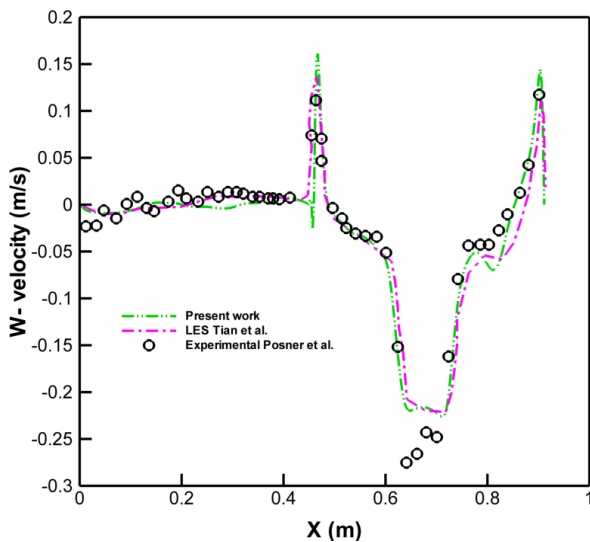
$$\rho u(x, t) = \sum_i f_i(x, t) c_i$$



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

### ۶- نتایج

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



**Fig. 5. Vertical velocity along the horizontal line at mid-partition height from the left wall to the right wall**

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

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

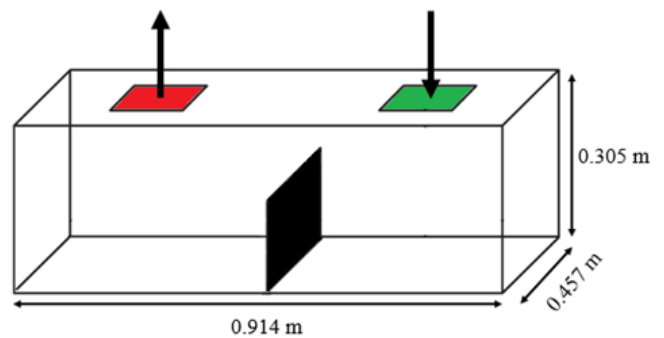
$$n_i(t) = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_1}{\Delta t}} \quad (26)$$

$$S_1 = \frac{216\nu k_b T}{\pi^2 \rho d^5 S^2 C_c}$$

$\zeta_i$  عدد تخمینی گوسین<sup>۳</sup>،  $k_b$  ثابت بولتزمن و  $T$  دما بر حسب درجه کلون می‌باشد.

### ۵- اعتبار سنجی

در این بخش صحت حل انجام شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجایی 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<sup>۴</sup> [۳۱] در سال ۲۰۰۳ (آزمایشگاهی) و تیان و همکاران<sup>۵</sup> [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.

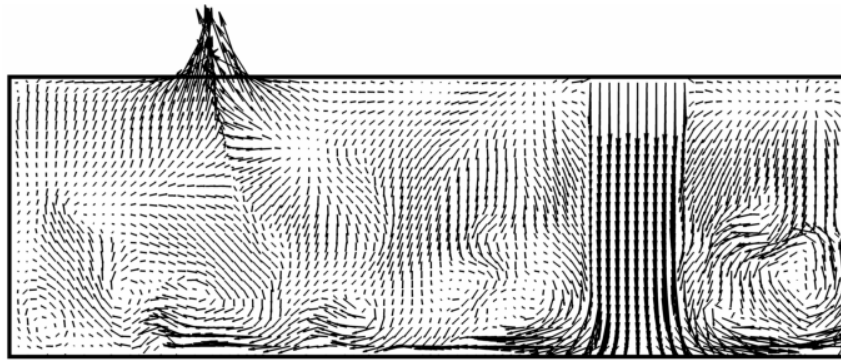


**Fig. 3. Studied geometry by Posner et al. [31] and Tian et al. [32]**

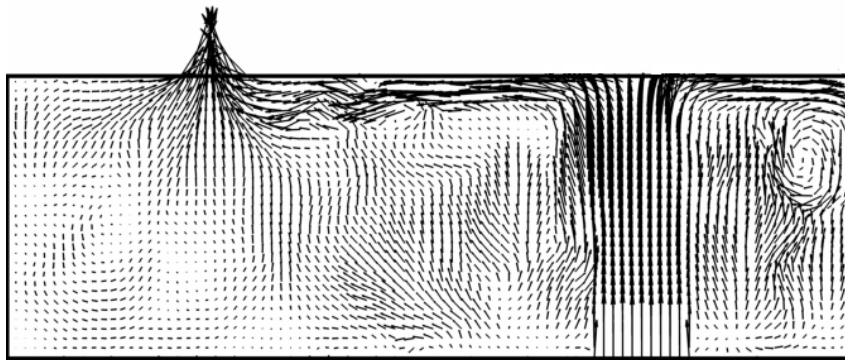
شکل ۳: هندسه بررسی شده توسط پوسنر و همکاران [۳۱] و تیان و همکاران [۳۲]

- 1 Bouyancy force
- 2 Brownian force
- 3 Zero mean, unit variance independent Gaussian random number
- 4 Posner et al.
- 5 Tian et al.





(الف)



(ب)

**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  $Y=0.2285$  برای حالت دریچه ورودی هوا در (الف) سقف و (ب) کف.

اما پس از آن این تعداد تقریباً ثابت شده و تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود، 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 می‌باشد 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 خروجی منتقل نشده‌اند. همچنین با توجه به اینکه ذره با اندازه ۱۰ میکرومتر وزن بیشتری دارد، نیروی گرانش باعث می‌شود 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

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 ۸۶۴۰۰ 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 تقریباً رفتار یکسانی را نشان می‌دهند به طوریکه تا زمان ۳۰ ثانیه یعنی هنگامی که تزریق ذره متوقف می‌شود تعداد ذرات ته نشین شده افزایش می‌یابد

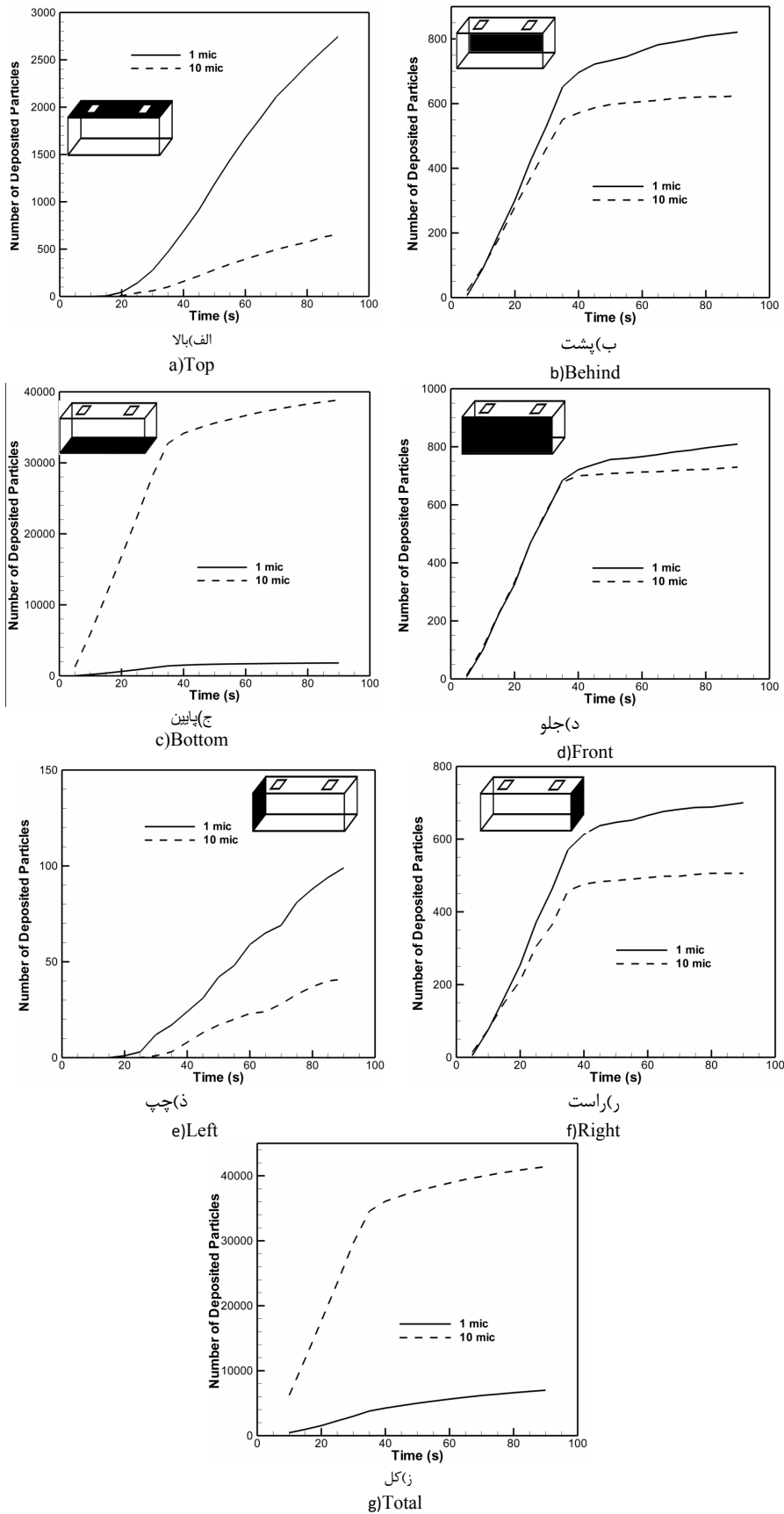
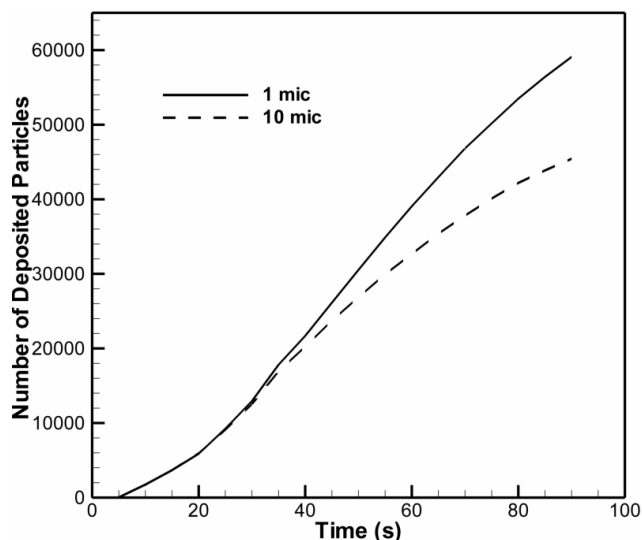


Fig. 7. Number of deposited particles on the various walls for inlet air location on the ceiling

شکل ۷: تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیوارهای مختلف برای حالت دریچه ورودی هوا در کف





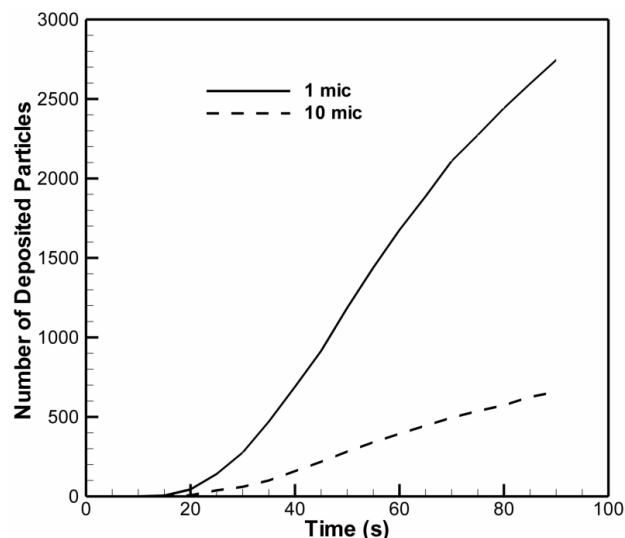
**Fig. 10. Number of exited particles for inlet air location on the floor**

شکل ۱۰: تعداد ذرات خارج شده از اتاق برای حالت دریچه در کف.

تعداد ذرات خارج شده از اتاق برای حالت دریچه در کف در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود 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 می‌باشد.

#### 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 تقریباً 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.



**Fig. 8. Number of exited particles for inlet air location on the ceiling**

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 دیواره‌ها را برای حالتی که دریچه ورودی هوا در کف قرار دارد نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارهای دیواره‌های جلو، عقب و راست رفتاری مشابه حالت قبلی نشان می‌دهند. اما در مورد دیواره بالا با توجه به اینکه جهت جریان در این حالت به سمت بالا می‌باشد تعداد ذرات ته نشین شده بیشتر از حالت قبلی (دریچه در سقف) است و مقدار آن در ثانیه‌های اول تزریق ذره صفر نیست. همچنین در مورد دیواره پایین تعداد ذرات ته نشین شده در حالتی که دریچه در سقف قرار دارد بیشتر از حالتی است که در کف قرار دارد و دلیل آن وجود نیروی گرانش به سمت پایین است. برای دیواره چپ نیز تغییر مکان دریچه ورودی تاثیری بر میزان ته نشینی ذرات نخواهد داشت. تعداد کل ذرات ته نشین شده برای حالت دریچه در کف کمتر از حالت دریچه در سقف است.

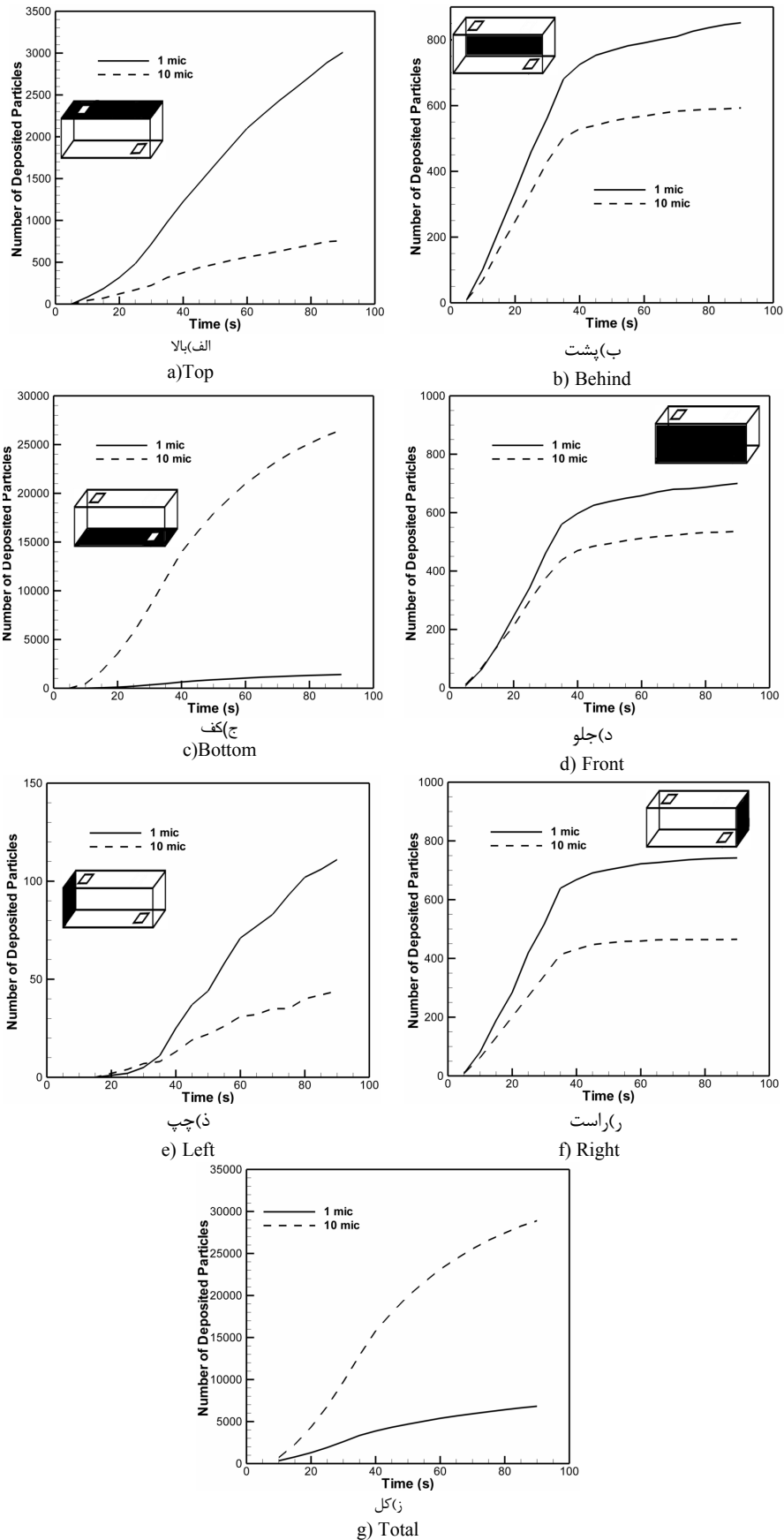


Fig. 9. Number of deposited particles on the various walls for inlet air location on the floor

شکل ۹: تعداد ذرات ته نشین شده بر روی دیواره های مختلف برای حالت درجه ورودی هوا در سقف.

## 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 زمین
$T$	دما، K
$t$	زمان، s
$f$	تابع توزیع سرعت
$S$	نسبت چگالی ذره به سیال
$d$	قطر ذره
$Re$	عدد رینولدز
$\tau_p$	زمان آرامش ذره
$u$	سرعت
$\Delta t$	گام زمانی
$C_i$	سرعت ذرات در شبکه بولتزمن
$k_b$	ثابت بولتزمن
$\Delta$	مقیاس فیلتر
$C_c$	ضریب تصحیح کانینگهام

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی مغشوش
$\lambda$	متوسط پویش مولکولی

## مراجع

- Investigation of MHD natural convection in a porous media by double MRT lattice Boltzmann method utilizing MWCNT–Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/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*
- [1]. 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’Humières, 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 from 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

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](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16946.6481)

