

ارزیابی تاثیر سرعت جریان هوای فن کویل بر توزیع ذرات میکرومتری در ناحیه تنفسی افراد

مرتضی طاهری^۱، سید علیرضا ذوالفقاری^{۱*}، حسن حسن‌زاده^۱، مازیار سلمان‌زاده^۲

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۱۸

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

کلمات کلیدی:

کیفیت هوای داخل

آلاینده‌های ذره‌ای

ناحیه تنفسی

فن کویل

ذرات میکرومتری

خلاصه: امروزه افراد بیش‌تر وقت خود را در فضاهای داخلی سپری می‌کنند، از این رو آلاینده‌های ذره‌ای موجود در این فضاها می‌تواند تهدیدی جدی برای سلامتی افراد محسوب شوند. بنابراین بررسی توزیع و ته‌نشینی آلاینده‌های ذره‌ای در فضاهای داخلی به منظور ارزیابی کیفیت هوای داخل از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به کاربرد گسترده فن کویل در فضاهای بسته جهت سرد و گرم کردن، در این پژوهش به بررسی تاثیر سرعت و حجم هوای خروجی از فن کویل بر غلظت ذرات با اندازه‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر در ناحیه تنفسی افراد نشسته (۰/۹ تا ۱/۱ متری) و ایستاده (۱/۵ تا ۱/۷ متری) پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بسته حل توسعه‌یافته توسط نویسندگان در حلگر این فوم، غلظت ذرات در اتاقی دارای فن کویل با دو سرعت هوای خروجی ۱/۵ و ۳ متر بر ثانیه، بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که ذرات بزرگ (۱۰۰ میکرومتر) کم‌تر متاثر از شرایط تهویه اتاق بوده و پس از زمانی کوتاهی، در حدود ۱۰ ثانیه، ته‌نشین می‌شوند، در حالی که ذرات کوچک‌تر (کم‌تر از ۱۰ میکرومتر) به دلیل دنبال کردن خطوط جریان تحت تاثیر الگوی جریان و شرایط تهویه اتاق می‌باشند و پس از گذشت مدت زمان بیش‌تری (در حدود زمان ۸۰۰ ثانیه) ته‌نشین می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که هر چقدر سرعت و حجم هوای خروجی از فن کویل افزایش پیدا کند، حجم جابه‌جایی هوا در اتاق بیش‌تر شده و در نتیجه ذرات بیش‌تری توسط فیلتر موجود در فن کویل فیلتر می‌شوند و درصد ذرات ته‌نشین شده در کف اتاق کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

غیریکنواخت در فضاها پخش شده و به همین دلیل، کنترل آن‌ها نسبت به آلاینده‌های گازی شکل پیچیده‌تر است [۳]. جابه‌جایی آلاینده‌های ذره‌ای در محیط‌های تهویه شده، متأثر از عوامل متعددی هستند که از آن جمله می‌توان به الگوی جریان، خواص ذرات، هندسه فضا، نرخ تهویه، جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی و شناوری حرارتی اشاره کرد [۴].

آلاینده‌های ذره‌ای تهدیدی جدی برای سلامتی انسان‌ها است، لذا ساده انگارانه است اگر تصور کنیم که این تهدید فقط مربوط به فضاهای بیرون از ساختمان‌ها بوده و فضاهای داخلی مصون از این خطر هستند. نفوذ آلاینده‌های ذره‌ای از فضای بیرون به داخل و همچنین تولید آن‌ها در فضاهای داخلی منشاء وجود ذرات در فضاهای داخلی هستند. تاثیر آلاینده‌های ذره‌ای بر سلامت انسان شامل تحریک چشم، بینی و گلو، بیماری‌های تنفسی و مرگ زودرس ناشی از تشدید بیماری‌های قلبی در افراد مبتلا به بیماری‌های قلبی است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که اندازه ذرات، تاثیر مستقیمی بر سلامت افراد دارند و ذرات کوچک‌تر (با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرومتر) می‌توانند حتی از طریق ریه وارد خون شده [۵] و سلامت افراد را تهدید کنند، از این

امروزه مردم بیش‌تر وقت خود را در ساختمان‌ها و فضاهای سرپوشیده سپری می‌کنند، از این رو ارتقای سطح کیفیت هوای داخل^۱ تاثیر زیادی بر سلامت و کارایی افراد دارد. بررسی کیفیت هوای داخل برای تعیین میزان آلاینده‌ها و کنترل غلظت این آلاینده‌ها در ناحیه تنفسی^۲ افراد با اهمیت است [۱]. آلاینده‌های موجود در هوا را می‌توان به دو دسته گازها و ذرات^۳ تقسیم کرد [۲]. گازها شامل دی اکسید کربن، رادون، ترکیبات آلی، بوها و ... هستند که منشاء آن‌ها می‌تواند مواد ساختمانی، تاسیسات و تجهیزات، ساکنین و فعالیت‌های انسانی باشد که همگی جز منابع آلاینده‌های با منشا داخلی محسوب می‌شوند و یا منابع خارجی شامل فعالیت مراکز صنعتی، وسایل نقلیه و خاک که مربوط به منابع آلاینده‌های با منشا خارج از ساختمان هستند. ذرات نیز می‌توانند منشاء داخلی یا خارجی داشته باشند و معمولاً به صورت

- 1 Indoor Air Quality (IAQ)
- 2 Breathing zone
- 3 Particles

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zolfaghari@birjand.ac.ir



رو امروزه بررسی غلظت ذرات آلاینده در فضاهای سرپوشیده از موضوعات مهم مورد بحث پژوهشگران محسوب می‌شوند.

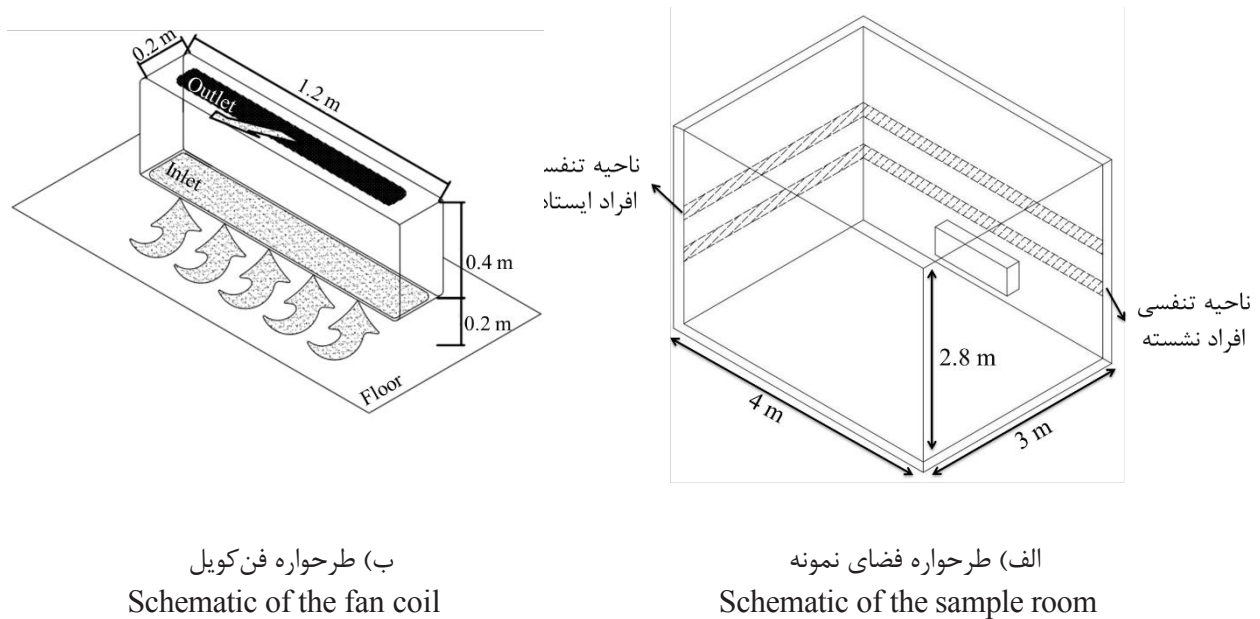
براساس گزارش سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا^۱ [۵]، غلظت آلاینده‌های هوا در فضاهای داخلی دو تا پنج برابر و گاهی اوقات حتی صد برابر بیش‌تر از غلظت آلاینده‌ها در فضای باز است. بنابراین بررسی تاثیر سیستم تهویه مطبوع در چگونگی توزیع و ته‌نشینی آلاینده‌های ذره‌ای (به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی هوا) بر کیفیت هوای داخل امری ضروری است. تهویه یکی از روش‌های رایج جهت کنترل کیفیت هوای داخل محسوب می‌شوند زیرا از طریق تهویه، بخشی از آلاینده‌ها از محیط خارج شده و غلظت آلاینده‌ها در فضاها کاهش می‌یابد [۶ و ۷]. استانداردهای کیفیت هوا به وسیله سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده بر دو نوع استانداردهای اولیه و ثانویه بنا شده‌اند. استانداردهای اولیه، آن دسته از استانداردهایی هستند که رعایت آن‌ها برای حفظ سلامتی عمومی جامعه (صرف نظر از مسائل اقتصادی و تکنولوژی) الزامی است. رعایت این گونه استانداردها برای حفظ سلامتی افراد حساس به ویژه سالمندان، بیماران تنفسی و کودکان امری بسیار ضروری است. استانداردهای ثانویه کیفیت هوا نسبت به استانداردهای اولیه دارای ابعاد وسیع‌تری هستند به طوری که در این استانداردها حفاظت منابع و آسایش عمومی مد نظر قرار گرفته است. استاندارد اولیه کیفیت هوا برای ذرات معلق 75 mg/m^3 (میانگین سالانه) و استاندارد ثانویه 60 mg/m^3 می‌باشند.

در سال‌های اخیر، کیفیت هوای داخل تحت عملکرد سیستم‌های تهویه مختلف، توسط پژوهشگران از زوایای مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لو و همکاران [۸] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی توزیع و ته‌نشینی ذرات در یک اتاقک دو ناحیه‌ای^۲ پرداختند. آن‌ها فرض کردند که ذرات همراه با جریان هوا از پنجره وارد اتاقک شوند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که ذرات کوچک‌تر نسبت به ذرات بزرگ‌تر تاثیر بیش‌تری بر کیفیت هوای داخل دارند. ژائو و همکاران [۴] به مقایسه ته‌نشینی و غلظت ذرات ایروسل داخلی^۳ در اتاق‌های با تهویه جابه‌جایی^۴ و اختلاطی^۵ پرداختند. آن‌ها ته‌نشینی و غلظت ذرات با قطرهای ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که ذرات با اندازه‌های مختلف دارای توزیع متفاوتی در فضای نمونه هستند. همچنین، آن‌ها نشان دادند که

- 1 United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA)
- 2 Two-zone chamber
- 3 Indoor aerosol particle
- 4 Displacement ventilation
- 5 Mixing ventilation

ته‌نشینی و غلظت ذرات به طور قابل توجهی متأثر از شرایط تهویه است. چن و ژانگ [۹] به پیش‌بینی انتقال ذرات در محیط‌های داخلی پرداختند. آن‌ها از روش‌های اویلری و لاگرانژی برای مدل‌سازی انتقال ذرات استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که هر دو مدل برای پیش‌بینی انتقال ذرات دارای دقت قابل قبولی هستند. چن و همکاران [۱۰] به مدل‌سازی توزیع و ته‌نشینی ذرات در محیط‌های داخلی پرداختند و نشان دادند که مدل ارائه شده می‌تواند به دقت ته‌نشینی ذرات را ارزیابی کند. ژائو و همکاران [۱۱] از یک مدل شار رانشی^۶ جدید جهت مدل‌سازی پخش ذرات بسیار ریز در محیط‌های داخلی با تهویه جابه‌جایی و اختلاطی استفاده کردند. ایشان نشان دادند که ذرات بسیار ریز در تهویه اختلاطی در ناحیه زیر یک متر دارای غلظت بیش‌تری نسبت به تهویه جابه‌جایی است. گلکارفرد و طالبی‌زاده [۱۲] به مقایسه عددی پخش و ته‌نشینی ذرات با قطر بین ۰/۳ تا ۱۰ میکرومتر در گرمایش رادیاتوری و سیستم گرمایش از کف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که نرخ ته‌نشینی ذرات در حالت استفاده از گرمایش رادیاتوری نسبت به سیستم گرمایش از کف بیش‌تر است. لی و همکاران [۱۳] توسط یک روش اویلری-اویلری جدید به بررسی انتقال ذرات در محیط‌های داخلی پرداختند. این مدل جدید مستقیماً غلظت ذرات را در فضا محاسبه می‌کند و نیاز به محاسبات کم‌تری جهت محاسبه غلظت است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که این روش دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با روش لاگرانژی است.

در تحقیقات پیشین بررسی توزیع و ته‌نشینی ذرات در محیط‌های داخلی تهویه شده توسط روش‌های مختلف تهویه شامل سیستم جابه‌جایی، اختلاطی، رادیاتور و گرمایش از کف مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدلیل هزینه تعمیرات و نگهداری کم فن‌کویل‌های زمینی در مقایسه با دیگر سیستم‌ها در محیط‌های داخلی، جهت سرمایه‌گذاری و گرمایش، استفاده از آن‌ها گسترده است ولی کیفیت هوای داخلی با این نوع سیستم در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین لازم است کیفیت هوای داخل و بخصوص نحوه توزیع و ته‌نشینی آلاینده‌های ذره‌ای در محیط‌های دارای فن‌کویل مورد بررسی قرار گیرند. از این رو در پژوهش حاضر یکی از عوامل مهم تاثیرگذار، یعنی سرعت جریان هوای خروجی از فن‌کویل، بر غلظت ذرات میکرومتری (۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر) و کیفیت هوای داخل مورد بررسی قرار گرفته است.



(ب) طرحواره فن کویل
Schematic of the fan coil

(الف) طرحواره فضای نمونه
Schematic of the sample room

شکل ۱: فضای نمونه

Fig. 1. Sample room a) Schematic of the sample room, b) Schematic of the fan coil

هدایت حرارتی ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین، دمای دیواره‌های دفتر کار ثابت و برابر با ۲۷ درجه سلسیوس فرض شده است. جهت مدل‌سازی فرض می‌شود که فن کویل باعث ورود ذرات فضای بیرون به داخل اتاق نمی‌شود، لذا ذرات در فضای اتاق وجود داشته و مطابق شکل ۱-ب، دارای توزیع یکنواختی است که ابتدا دارای سرعت صفر بوده و تحت تاثیر جریان داخل اتاق شروع به حرکت می‌کند. از اثر ذرات بر جریان هوا و همچنین اثر ذرات بر یکدیگر صرف نظر شده است. پس از آن، چگونگی توزیع و ته‌نشینی ذرات تحت جریان پایا مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین فرض می‌شود که ذرات کروی شکل بوده و پس از برخورد به سطوح داخلی به سطوح می‌چسبند و دوباره در هوا معلق نخواهند شد [۴ و ۱۵-۱۴].

۳- ابزار تحقیق و معادلات حاکم

۳-۱- ابزار تحقیق

در پژوهش حاضر، ابتدا معادلات میدان جریان سیال در دیدگاه اولبری حل و سپس با استفاده از میدان سرعت و فشار سیال به دست آمده، معادلات حاکم به حرکت ذرات توسط روش لاگرانژی حل می‌شوند. برای ترسیم هندسه و ایجاد شبکه، از نرم‌افزار سالوم^۱ همراه با شبکه غیرسازمان یافته

۲- فضای نمونه

در پژوهش حاضر یک دفتر کار به طول ۴ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۲/۸ متر به عنوان فضای نمونه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، از یک فن کویل با ابعاد طول ۱/۲ متر، عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۴ متر برای سرمایش محیط استفاده شده است. دریچه خروجی هوا از فن کویل که در قسمت بالای آن قرار دارد، دارای طول ۱ متر و عرض ۰/۱ متر می‌باشد. کل سطح زیر فن کویل به عنوان سطح هوای ورودی به فن کویل در نظر گرفته شده است. دمای هوای خروجی از فن کویل ۲۵/۲ درجه سلسیوس فرض شده که می‌تواند تحت زاویه ۳۰ درجه و با دو سرعت ۱/۵ و ۳ متر بر ثانیه از آن خارج شوند. در حالت سرعت هوای خروجی ۱/۵ متر بر ثانیه، دمای ۲۵/۲ درجه سلسیوس برای ورودی به نحوی تعیین شده که نیاز سرمایشی اتاق تامین گردد. به بیان دیگر، دمای مذکور بر مبنای نیاز سرمایشی اتاق با در نظر گرفتن شرایط مطلوب آسایش حرارتی برای ساکنان تعیین شده است. با افزایش سرعت هوای خروجی به ۳ متر بر ثانیه، می‌بایست دمای آن نیز به منظور تامین نیاز سرمایشی تغییر کند اما از آنجایی که این اختلاف دما ناچیز است و تأثیر آن بر الگوی پخش ذرات بسیار اندک می‌باشد، بنابراین برای هر دو حالت سرعت هوای خروجی دمای ۲۵/۲ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش روی دیواره‌های جامد برای سرعت لحاظ شده و سیال هوا تراکم‌ناپذیر با ویسکوزیته و ضریب

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_t + \mu \quad (5)$$

۳-۳- معادلات حاکم بر حرکت ذرات

برای به دست آوردن موقعیت و سرعت ذرات در فضا، از قانون دوم نیوتن استفاده می‌شود.

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (6)$$

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \sum F_i \quad (7)$$

که در این رابطه x_p ، u_p و m_p به ترتیب مکان، سرعت و جرم هر ذره است. $\sum F_i$ برآیند نیروهای وارد بر هر ذره است.

$$\sum F_i = F_D + F_B + F_G \quad (8)$$

که F_D نیروی درگ، F_B نیروی شناوری و F_G نیروی ناشی از گرانش است. این نیروها، در مقایسه با سایر نیروها تاثیر بیش‌تری بر حرکت ذرات دارند [۱۷]. نیروی درگ توسط رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$F_D = \frac{1}{C_C} \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{m_p}{d_p} \cdot C_D (u - u_p) |u - u_p| \quad (9)$$

که d_p قطر هر ذره است. C_C ضریب تصحیح کانینگهام^۵ است که از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda}) \quad (10)$$

این ضریب با توجه به مقدار عدد نادسن^۶ $(\frac{2\lambda}{d_p})$ و در صورت خارج شدن از حیطه فرض محیط پیوسته به کار می‌رود. در پژوهش حاضر با توجه به اندازه ذرات به کار رفته d_p و λ فاصله پویس آزاد^۷ برای هوا در شرایط استاندارد، این ضریب مساوی یک در نظر گرفته شده است.

استفاده شده است. سپس برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم بر میدان جریان سیال از حلگر عددی اپن‌فوم^۱ و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل فوم^۲ استفاده شده است. حلگر مذکور از روش حجم محدود جهت خطی کردن معادلات حاکم استفاده می‌کند. در این حلگر از تقریب بوزینسک^۳ برای در نظر گرفتن اثرات جابه‌جایی طبیعی بر معادله جریان و از الگوریتم سیمپل برای تصحیح جفت‌شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. در نهایت با استفاده از بسته حل توسعه یافته پیمپل فوم^۴ توسط نویسندگان در حلگر عددی اپن‌فوم، معادلات مربوط به حرکت ذرات حل می‌شوند.

۳-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر میدان جریان پایه، غیرقابل تراکم با خواص ثابت عبارتند از [۱۶]:
معادله بقای جرم:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

معادلات اندازه حرکت:

$$\rho (\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} + \vec{s} \quad (2)$$

معادله بقای انرژی:

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T + s_T \quad (3)$$

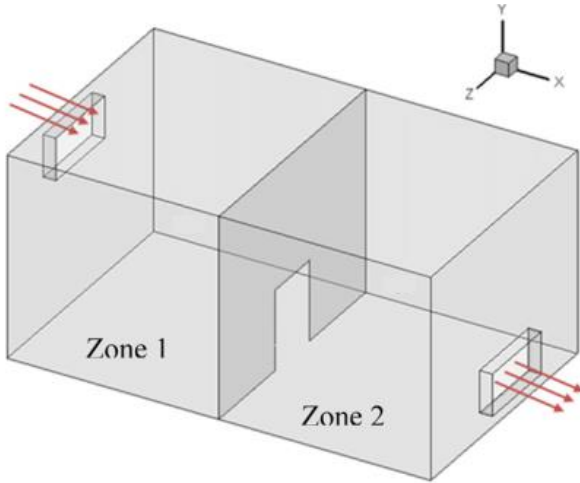
که \vec{s} در معادله اندازه حرکت نشان‌دهنده نیروی شناوری وارده بر واحد حجم سیال است که به کمک تقریب بوزینسک به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\vec{s} = \rho \vec{g} [1 - \beta (T - T_0)] \quad (4)$$

در این رابطه β ضریب انبساط حجمی و \vec{g} بردار شتاب جاذبه زمین است. μ_{eff} لزجت موثر سیال است که برای جریان آشفته به صورت حاصل جمع لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال بیان می‌شود. لزجت اغتشاشی سیال توسط مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ استاندارد محاسبه می‌شود.

5 Cunningham correction
6 Knudsen number
7 Mean Free Path (MFP)

1 OpenFoam
2 buoyantBoussinesqSimpleFoam
3 Boussinesq approximation
4 pimpleFoam



شکل ۲: هندسه مورد استفاده در پژوهش لو و همکاران [۸ و ۱۹]

Fig. 2. The geometry used in the study of Lu et al. [8,19]

ضریب درگ (C_D)، توسط روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند [۱۸]:

$$Re_p = \rho d_p (u_p - u) / \mu \quad (11)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^2 / 3 \right); & Re_p \leq 1000 \\ 0.424 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (12)$$

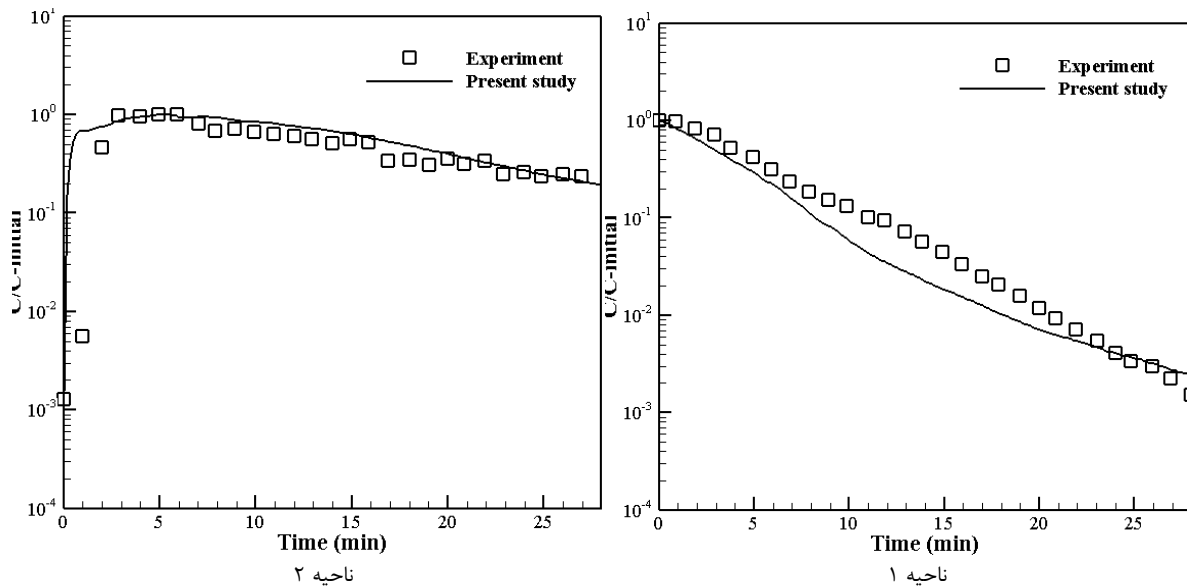
برآیند نیروهای شناوری و گرانش توسط رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$F_B + F_G = \frac{(\rho_p - \rho) \pi d_p^3}{6} g \quad (13)$$

۳-۴- اعتبارسنجی

نرخ تعویض هوای ساعتی و سرعت هوای ورودی به ترتیب برابر (hr^{-1}) و $۱۰/۲۶ \left(\frac{m}{s} \right)$ است. با توجه به دسته‌بندی اندازه ذرات استفاده شده در شرایط آزمایشگاهی، ذرات با قطر ۵ میکرومتر در مدل‌سازی استفاده شده است. آن‌ها ابتدا ذرات را در ناحیه ۱ قرار دادند و پس از ورود جریان هوا به داخل ناحیه ۱، غلظت ذرات را در طول زمان به مدت ۲۷ دقیقه در ناحیه ۱ و ۲ مورد بررسی قرار دادند. در شکل ۳ مقایسه بین نتایج مدل‌سازی حاضر

به منظور اعتبارسنجی و بررسی توانایی بسته حل توسعه یافته توسط نویسندگان در نرم‌افزار اپن‌فوم، غلظت ذرات در یک اتاق دو ناحیه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش به صورت آزمایشگاهی توسط لو و همکاران [۸ و ۱۹] انجام شده است. مطابق شکل ۲ هندسه مورد بررسی، اتاقی به طول ۵ متر، عرض ۲/۴ و ارتفاع ۳ متر است که به دو ناحیه تقسیم شده است.



شکل ۳: اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی لو و همکاران [۸ و ۱۹]

Fig. 3. Model validation against the result of Lu et al. [8,19]

با سرعت پایین‌تر متفاوت باشد.

در شکل ۵ منحنی نسبت تعداد ذرات موجود در ناحیه تنفسی (C_p) به تعداد ذرات اولیه در این ناحیه (C_i) بر حسب زمان برای ذرات با اندازه‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ برای دو سرعت هوای خروجی از فن کویل نشان داده شده است. شکل ۵-الف تعداد ذرات ۱۰۰ میکرومتری را در ناحیه تنفسی افراد نشان می‌دهد. مطابق این شکل، برای ذرات ۱۰۰ میکرومتری، نیروی وزن نسبت به دو نیروی درگ و شناوری نیروی غالب است از این رو ذرات پس از مدت زمان کوتاهی (کمتر از ۱۰ ثانیه) ته‌نشین می‌شوند. نتایج مدل‌سازی همچنین نشان می‌دهد که این ذرات کمتر تحت تأثیر سرعت هوای خروجی از فن کویل قرار می‌گیرند. با توجه به این که ذرات در ابتدا در فضای اتاق یکنواخت فرض شده‌اند، ذرات موجود در ناحیه تنفسی افراد ایستاده پس از چند ثانیه وارد ناحیه تنفسی افراد نشسته شده و ذرات موجود در ناحیه تنفسی افراد نشسته، به مرور زمان ته‌نشین می‌شوند. به همین دلیل است که غلظت ذرات مطابق شکل ۵-الف، در ناحیه تنفسی افراد ایستاده سریع‌تر به صفر می‌رسند.

شکل ۵-ب تعداد ذرات ۱۰ میکرومتری در ناحیه تنفسی افراد را نشان می‌دهد. این ذرات پس از گذشت مدت زمان نسبتاً طولانی (۸۰۰ ثانیه) نسبت به ذرات ۱۰۰ میکرومتری ته‌نشین می‌شوند. سرعت جریان هوا و شرایط تهویه، تأثیر بسیار زیادی بر غلظت و زمان ته‌نشینی این ذرات دارد. با توجه به اینکه ذرات پس از برخورد به سطوح به آن‌ها می‌چسبند، لذا افزایش سرعت جریان هوای خروجی از فن کویل باعث می‌شود که ذرات سریع‌تر ته‌نشین شوند که این برخلاف این تصور است که سرعت بیشتر باعث افزایش پخش ذرات و دیرتر ته‌نشین شده آن‌ها می‌شود. افزایش سرعت جریان هوای خروجی از فن کویل باعث افزایش تعداد دفعات چرخش هوا در اتاق شده و در نتیجه، ذرات بیشتر تری به سطوح برخورد کرده و جذب می‌شوند، در نتیجه در این حالت غلظت ذرات سریع‌تر به صفر می‌رسد.

همان‌طور که در شکل ۵-ج نشان داده شده است، ذرات ۱ میکرومتری رفتاری مشابه ذرات ۱۰ میکرومتری در اتاقی با شرایط تهویه یکسان دارند و این ذرات نیز به طور گسترده تحت تأثیر شرایط تهویه قرار داشته و وابسته به محل قرارگیری خود نیستند. ذرات ۱ میکرومتری در سرعت جریان هوای خروجی بیشتر، سریع‌تر ته‌نشین می‌شوند. به توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که در اتاقی با آلاینده‌های ذره‌ای با اندازه‌های کوچک (کمتر از ۱۰ میکرومتر)، کارکرد فن کویل با سرعت بالاتر باعث ته‌نشین شدن سریع‌تر ذرات موجود در هوا می‌شود.

با نتایج آزمایشگاهی لو و همکاران [۸ و ۱۹] ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همخوانی بسیار مناسبی میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی به چشم می‌خورد و همین امر نشان‌دهنده صحت و اعتبار قابل قبول مدل‌سازی حاضر است.

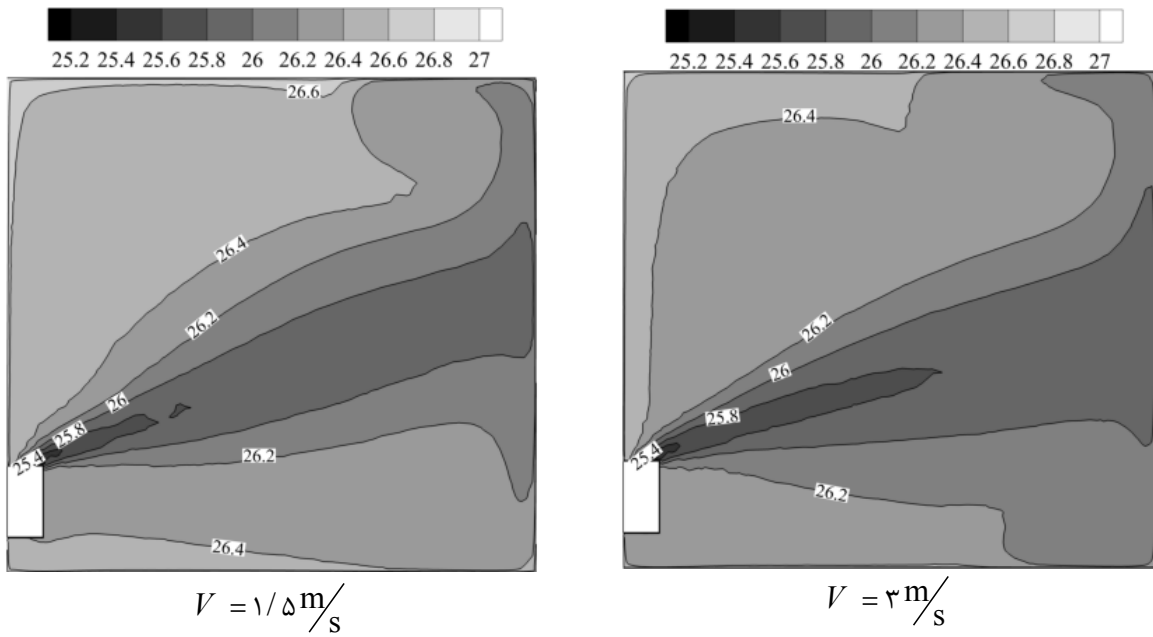
۳-۵- استقلال از شبکه

همان‌طور که اشاره شد، برای حل مسئله از یک شبکه‌بندی غیرسازمان یافته استفاده شده است. به دلیل گرادیان شدید کمیت‌ها در ورودی و خروجی دریچه‌های فن کویل، تراکم شبکه محاسباتی در این نواحی بیش‌تر است. برای انتخاب شبکه‌ای مناسب، لازم است که قبل از استخراج نتایج، استقلال حل از شبکه انجام شود. بنابراین، مسئله برای شبکه‌هایی با تعداد ۷۹۸۷۹۶۲، ۱۰۹۶۷۳۶ و ۱۵۰۵۵۶۳ گره حل شده است. نتایج توزیع سرعت و دما در صفحه میانی اتاق برای شبکه‌هایی با تعداد ۱۰۹۶۷۳۶ و ۱۵۰۵۵۶۳ نشان می‌دهد که تغییر چندانی بین آن‌ها وجود ندارد لذا از شبکه‌ای با ۱۰۹۶۷۳۶ گره به عنوان شبکه مناسب حل استفاده شده است.

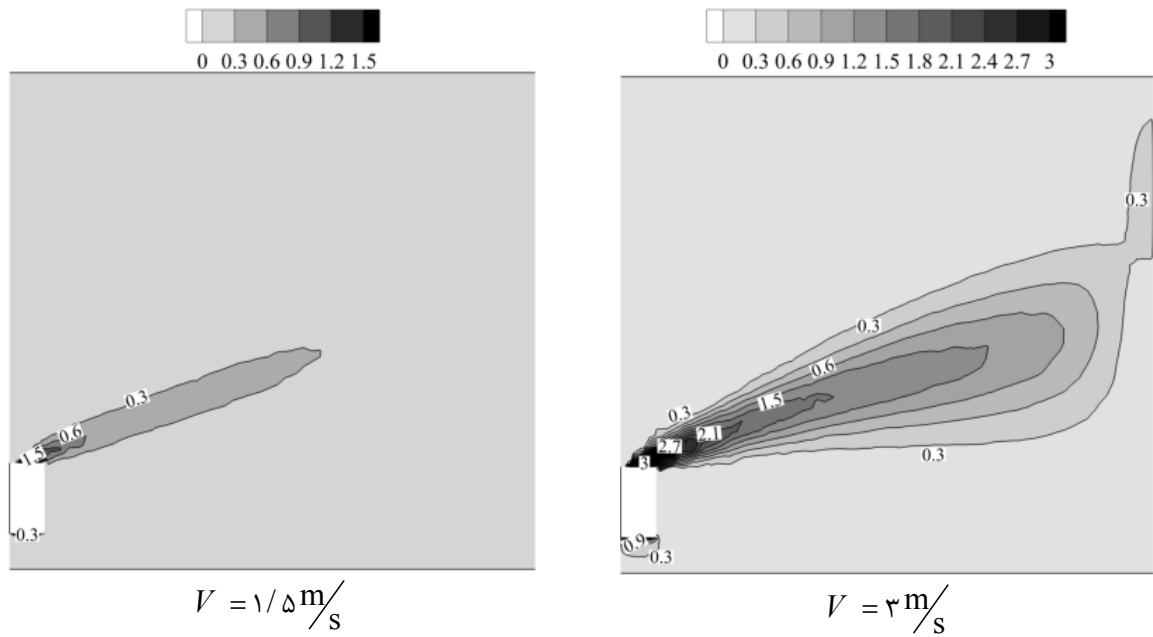
۴- نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر سرعت جریان هوای فن کویل زمینی مورب‌زن بر توزیع آلاینده‌های میکرومتری با اندازه‌های مختلف در یک محیط بسته است. در این راستا پس از برقراری شرایط جریان پایا در اتاق، با اعمال توزیع اولیه یکنواخت برای آلاینده‌های ذره‌ای با قطرهای ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر، توزیع و ته‌نشینی ذرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای بر سلامت افراد، غلظت ذرات میکرومتری در ناحیه تنفسی افراد نشسته (۰/۹ تا ۱/۱ متری) و ایستاده (۱/۵ تا ۱/۷ متری) مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۴ توزیع دما و سرعت در صفحه میانی اتاق برای دو سرعت ورودی ۱/۵ و ۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش سرعت هوای ورودی، سرعت جریان هوا در اتاق بیش‌تر شده است، در نتیجه تعداد دفعات چرخش جریان هوا در داخل اتاق افزایش می‌یابد. منحنی توزیع دما در صفحه میانی نیز نشان می‌دهد که با افزایش سرعت، در فضاهای بالا و پایین اتاق دما افزایش یافته است، به عبارت دیگر نواحی متأثر از دمای هوای ورودی گسترده‌تر شده است. انتظار می‌رود که با افزایش سرعت خروجی هوا از فن کویل، تعداد دفعات چرخش هوا در اتاق افزایش یافته و توزیع و ته‌نشینی ذرات در این حالت نسبت به حالت فن کویل



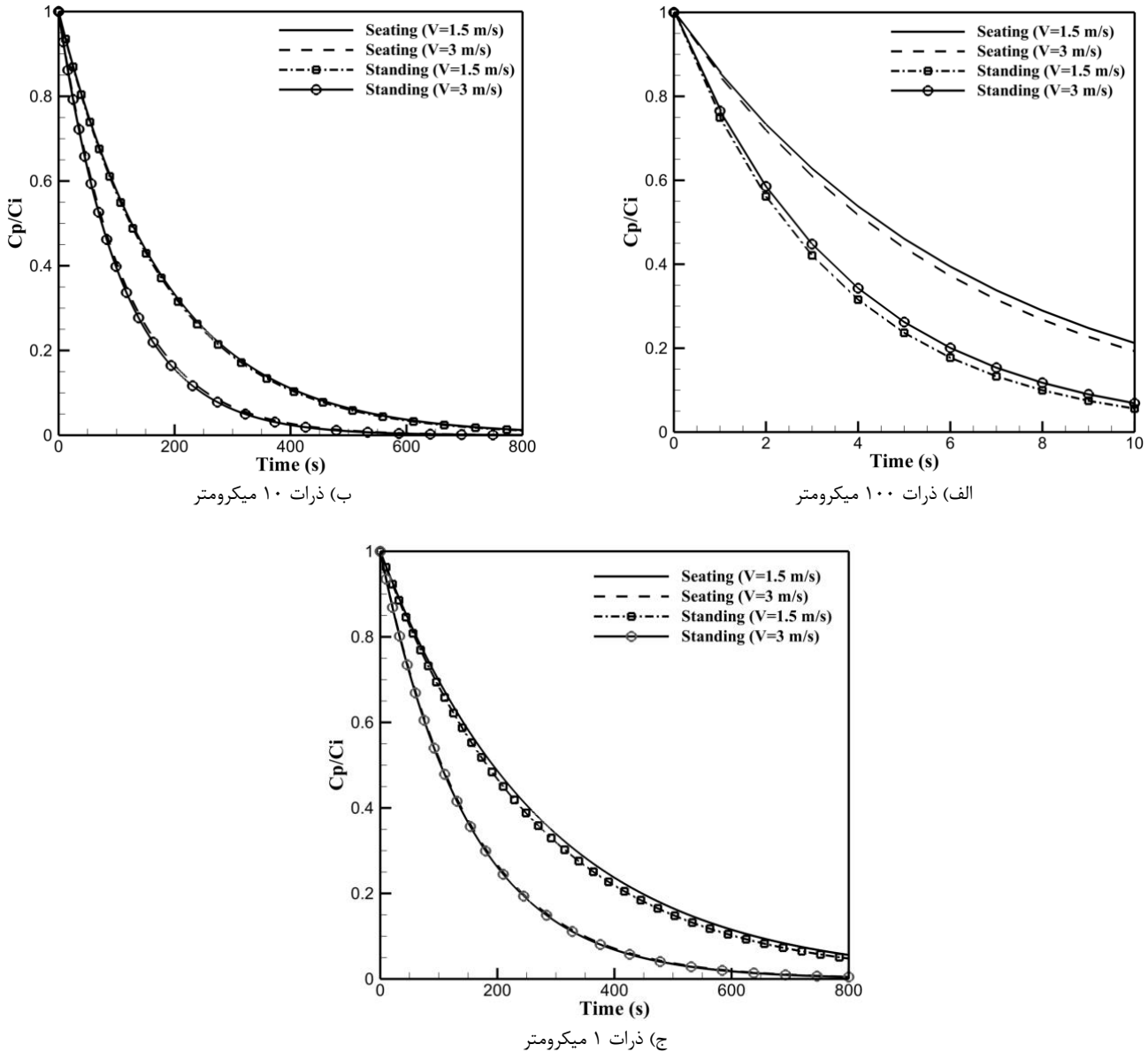
الف



ب

شکل ۴: (الف) توزیع دما (C°) و (ب) سرعت (m/s) در صفحه میانی اتاق

Fig. 4. Temperature Contour (°C), b) Velocity Contour (m/s) in middle face of room



شکل ۵: غلظت ذرات میکرومتری در ناحیه تنفسی افراد نشسته و ایستاده

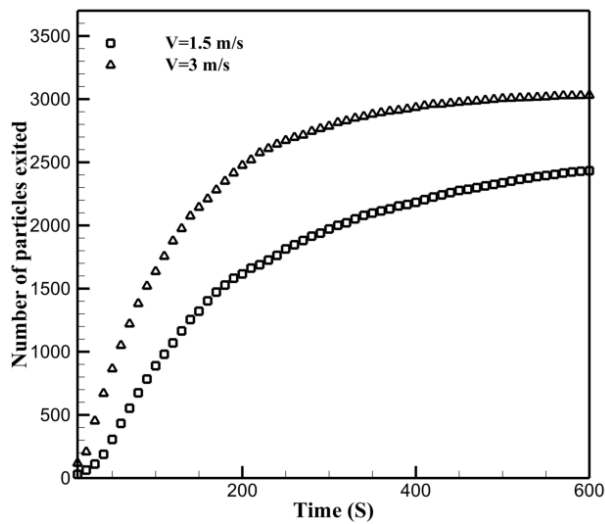
Fig. 5. The ratio of particles concentration to initial concentration in the sitting person breathing zone for (a) 100μm particles, (b) 10μm particles, (c) 1μm particles.

با توجه به اینکه زمان واکنش ذرات با مجذور قطر ذرات متناسب است، بنابراین ذرات ۱۰۰ میکرومتری زمان واکنش بزرگتری نسبت به ذرات ۱۰ و ۱ میکرومتری دارند. زمان واکنش بزرگتر باعث می‌شود که ذرات بزرگتر مجاور دیوارها زودتر جذب دیوار شده (به عنوان شرط مرزی لحاظ شده روی سطوح جامد) و غلظت ذرات بزرگتر سریع‌تر کاهش پیدا کند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز نشان می‌دهد که در فضاهای داخلی غلظت ذرات بزرگتر در مقایسه با ذرات کوچک‌تر سریع‌تر به صفر می‌رسد.

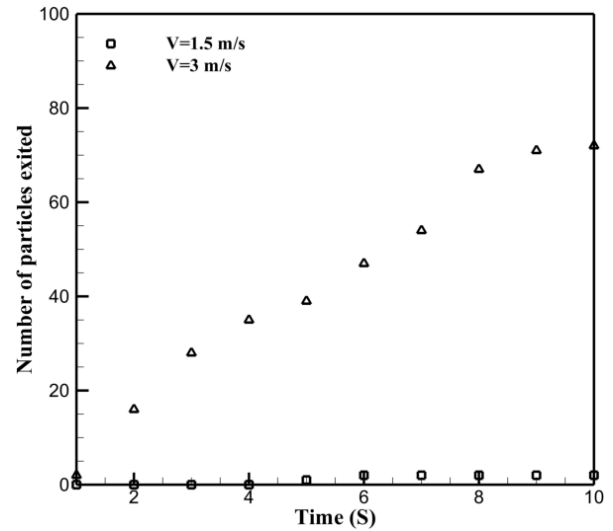
زمان واکنش ذرات یعنی مدت زمانی که پس از تغییر جهت جریان، ذرات همراه آن نیز تغییر جهت می‌دهند. این زمان مطابق رابطه (۱۴) وابسته به اندازه و جنس ذرات و لزجت هوا است.

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p C_c}{18 \mu} \quad (14)$$

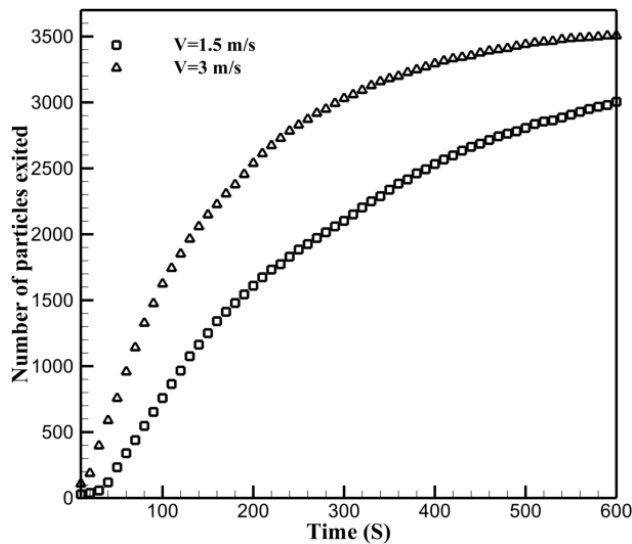
1 Relaxation Time



(ب) ذرات ۱۰ میکرومتر



(ف) ذرات ۱۰۰ میکرومتر



(ج) ذرات ۱ میکرومتر

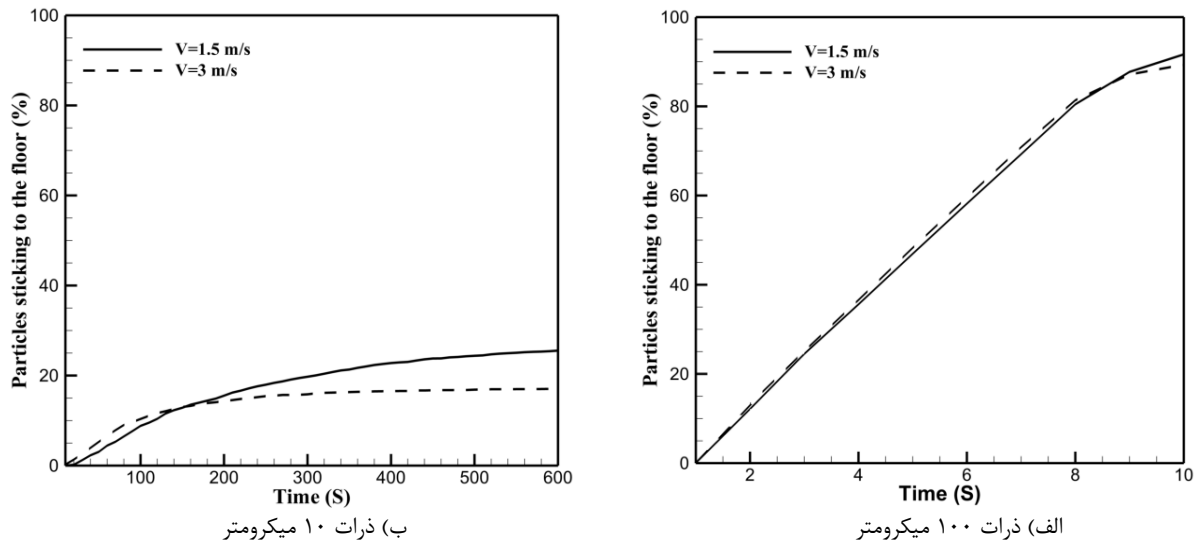
شکل ۶: تعداد ذرات فیلتر شده توسط فن کویل

Fig. 6. The number of filtered particles for (a) 100 μ m particles, (b) 10 μ m particles, (c) 1 μ m particles

سریع‌تر از فضای داخل اتاق جمع‌آوری می‌شوند. صحت این مطلب در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش سرعت هوای خروجی از فن کویل تعداد ذرات فیلتر شده توسط فن کویل افزایش می‌یابد. تعداد ذرات فیلتر شده در سرعت ۳ متر بر ثانیه فن کویل، برای ذرات ۱۰۰ میکرومتری ۷۲ و برای ذرات ۱۰ و ۱ میکرومتری به ترتیب ۳۰۳۱ و ۳۵۰۷ می‌باشند. همچنین به دلیل ماندگاری بیشتر ذرات کوچک‌تر در هوا، با کاهش اندازه ذرات، تعداد

با افزایش سرعت جریان هوا ورودی از فن کویل به اتاق، ذرات ۱ و ۱۰ میکرومتری سریع‌تر توسط فن کویل فیلتر می‌شوند. مطابق الگوی جریان شکل گرفته در اتاق، هوای خروجی از فن کویل پس از طی مسیر معین در اتاق وارد فن کویل شده و پس از عبور از فیلتر موجود در داخل فن کویل، ذرات فیلتر شده و هوا مجدداً وارد اتاق می‌شود. با افزایش سرعت هوای خروجی از فن کویل، مطابق شکل ۴، تعداد دفعات چرخش جریان در اتاق افزایش یافته و با افزایش تعداد دفعات عبور جریان از فیلتر موجود در فن کویل، ذرات



شکل ۷: درصد ذرات چسبیده به کف نسبت به کل ذرات

Fig. 7. The ratio of stucked particles to total particles for (a) 100 μ m particles, (b) 10 μ m particles

فن کویل، به منظور بررسی کیفیت هوای داخل در ناحیه تنفسی افراد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا تاثیر سرعت هوای خروجی از فن کویل بر توزیع ذرات میکرومتری با اندازه‌های ۱، ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر، در یک اتاق با فن کویل زمینی موربزن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که اندازه ذرات تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع آن‌ها دارند. با توجه به نتایج بدست آمده ذرات با اندازه کوچکتر کیفیت هوای داخل را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهند به طوری که ذرات ۱۰۰ میکرومتر به دلیل وزن بیشتر در مدت زمان ۱۰ ثانیه ولی ذرات با اندازه ۱۰ و ۱ میکرومتر در مدت زمان نسبتاً طولانی (۸۰۰ ثانیه) ته‌نشین می‌شوند.

بررسی تاثیر سرعت هوای خروجی از فن کویل نشان می‌دهد که هرچه قدر سرعت خروجی از فن کویل بیشتر باشد، تعداد دفعات چرخش هوای داخل اتاق بیشتر و در نتیجه ذرات بیشتری فیلتر شده و غلظت ذرات در ناحیه تنفسی سریعتر کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش سرعت هوای خروجی از فن کویل از ۱/۵ به ۳ متر بر ثانیه، درصد ذرات ته‌نشین شده کاهش می‌یابد، برای مثال برای ذرات ۱۰ میکرومتری با افزایش سرعت، درصد ذرات ته‌نشین شده از ۲۶ درصد به ۱۷ درصد کاهش می‌یابد، لذا با افزایش سرعت چرخش فن کویل غلظت ذرات در فضای بسته سریعتر کاهش می‌یابد.

ذرات فیلتر شده افزایش می‌یابند.

در شکل ۷ منحنی تغییرات درصد ذرات چسبیده به کف اتاق را نسبت به کل ذرات بر حسب زمان نشان می‌دهد. با توجه به این که زمان واکنش برای ذرات یک میکرومتری نسبت به ذرات ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر کمتر است لذا این ذرات بیشتر جریان را دنبال کرده و کمتر ته‌نشین می‌شوند. بر این اساس، تعداد ذرات ته‌نشین شده یک میکرومتری ناچیز بوده و تقریباً مساوی صفر است، به این دلیل در شکل ۷ منحنی درصد ذرات چسبیده به کف برای ذرات ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر ترسیم شده است. این اشکال نشان می‌دهند که با کوچکتر شدن اندازه ذرات، درصد ذرات چسبیده به کف کاهش می‌یابد به طوری که درصد کل ذرات چسبیده به کف پس از مدت زمان ۶۰۰ ثانیه برای ذرات ۱۰ و ۱۰۰ میکرومتر به ترتیب ۹۲ و ۲۶ درصد است. با افزایش سرعت هوای خروجی از فن کویل ۱/۵ به ۳ متر بر ثانیه، تعداد ذرات چسبیده به کف کاهش می‌یابد بطوریکه برای ذرات ۱۰ میکرومتری درصد ذرات ته‌نشین شده روی کف از ۲۶٪ به ۱۷٪ کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش غلظت ذرات میکرومتری در یک فضای بسته دارای

2003.

۶- فهرست علائم

- [7] Y. Zhang, Indoor Air Quality Engineering, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2004.
- [8] W. Lu, A.T. Howarth, N. Adam, S.B. Riffat, Modelling and measurement of airflow and aerosol particle distribution in a ventilated two-zone chamber, Building and environment, 31(5) (1996) 417-423.
- [9] Q. Chen, Z. Zhang, Prediction of particle transport in enclosed environment, China particulology, 3(6) (2005) 364-372.
- [10] F. Chen, C. Simon, A.C. Lai, Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model, Atmospheric Environment, 40(2) (2006) 357-367.
- [11] B. Zhao, C. Chen, Z. Tan, Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model, Journal of Aerosol Science, 40(1) (2009) 29-43.
- [12] V. Golkarfard, P. Talebizadeh, Numerical comparison of airborne particles deposition and dispersion in radiator and floor heating systems, Advanced Powder Technology, 25(1) (2014) 389-397.
- [13] X. Li, Y. Yan, Y. Shang, J. Tu, An Eulerian-Eulerian model for particulate matter transport in indoor spaces, Building and Environment, 86 (2015) 191-202.
- [14] B. Zhao, Z. Zhang, X. Li, D. Huang, Comparison of Diffusion Characteristics of Aerosol Particles in Different Ventilated Rooms by Numerical Method, ASHRAE Transactions, 110(1) (2004).
- [15] B. Zhao, Y. Zhang, X. Li, Numerical Analysis of the Movement of Biological Particles in Two Adjacent Rooms, ASHRAE Transactions, 110(2) (2004).
- [16] A. Zolfaghari, H. Hasanzadeh, M. Taheri, M. Raesi, M.

ضریب تصحیح کانینگهام	C_C
تعداد ذرات اولیه موجود در ناحیه تنفسی	C_i
تعداد ذرات موجود در ناحیه تنفسی در هر لحظه از زمان	C_p
قطر ذره	d_p
نیروی شناوری	F_B
نیروی درگ	F_D
نیروی ناشی از گرانش	F_G
جرم ذره	m_p
سرعت ذره	u_p
مکان ذره	x_p
فاصله پویش آزاد	λ

منابع

- [1] M. Rahimi-Gorji, O. Pourmehran, M. Gorji-Bandpy, T.B. Gorji, CFD simulation of airflow behavior and particle transport and deposition in different breathing conditions through the realistic model of human airways, Journal of Molecular Liquids, 209 (2015) 121-133.
- [2] Air Contaminants, in: ASHRAE Handbook: Fundamentals, 2009.
- [3] X. Wang, Y. Zhang, T.L. Funk, L. Zhao, G.L. Riskowski, Effect of Ventilation System on Particle Spatial Distribution in Ventilated Rooms, ASHRAE Transactions, 110(2) (2004).
- [4] B. Zhao, Y. Zhang, X. Li, X. Yang, D. Huang, Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method, Building and Environment, 39(1) (2004) 1-8.
- [5] U.S. EPA, Why Is the Environment Indoors Important to Us? Indoor Environment Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2000.
- [6] H.B. Awbi, Ventilation of buildings, Taylor & Francis,

- Applications of Computational Fluid Mechanics, 10(1) (2016) 30-43.
- [18] C.T. Crowe, J.D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, Y. Tsuji, Multiphase flows with droplets and particles, CRC press, 2011.
- [19] W. Lu, A.T. Howarth, Numerical analysis of indoor aerosol particle deposition and distribution in two-zone ventilation system, Building and Environment, 31(1) (1996) 41-50.
- Afzalian, Evaluating the effect of non-uniform summer wearing on local thermal sensation of passengers in a bus under two common ventilation systems, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2018), Accepted, (In Persian).
- [17] F. Greifzu, C. Kratzsch, T. Forgber, F. Lindner, R. Schwarze, Assessment of particle-tracking models for dispersed particle-laden flows implemented in OpenFOAM and ANSYS FLUENT, Engineering