



Air Inlet Angle Effects in Swirling Diffuser of UFAD Systems on Micron Particles Pattern Distribution

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Taheri M.¹ MSc,
Afzalian M.¹ MSc,
Zolfaghari S.A.*¹ PhD,
Hassanzadeh H.¹ PhD

How to cite this article

Taheri M, Afzalian M, Zolfaghari S.A, Hassanzadeh H. Air Inlet Angle Effects in Swirling Diffuser of UFAD Systems on Micron Particles Pattern Distribution. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):3083-3093.

¹Mechanical Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Department, Engineering Faculty, University of Birjand, Birjand, Iran
Phone: -
Fax: -
zolfaghari@birjand.ac.ir

Article History

Received: October 18, 2018

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

ABSTRACT

Particle pollutants in the indoor environment are a serious threat to human health. Therefore, it is necessary to recognition, investigation, and controls of the distribution of these particles in the indoor environment. In the present research, the effect of air inlet angle of swirling diffusers in UFAD systems has been investigated on micron particles pattern distribution by considering the thermal comfort condition. For analyzing the fluid flow and particle distribution, the development of OpenFoam solver by the Eulerian-Lagrangian method has been used. The two-node model of Gauge has been used for predicting the thermal comfort conditions. Inlet angles are set in three cases of 30, 45 and 60. Based on the results, in all three cases, the TSENS index is in the thermal comfort zone. However, by changing the swirling angle from 30 to 60, the vertical temperature difference can be reduced about 1%. Investigation of changing the inlet angle shows that at inlet angle of 30 and 60 degrees, the percentage of particles exited with 2.5 micrometers diameter were 32% and 55% of the total particles, respectively. In other words, increasing the inlet air angle can lead to exit more amount of any size of particles from the room. In addition, by increasing particles size, larger particles removed faster from the breathing zone, and smaller particles will remain longer time in the air. Therefore, smaller particles have a greater impact on indoor air quality.

Keywords Thermal Comfort; Particle Distribution; Swirling Diffuser; Indoor Air Quality

CITATION LINKS

[1] ICFD simulation of airflow behavior and particle transport and deposition in different breathing conditions through the realistic model of human airways [2] ASHRAE Handbook: Fundamentals [3] Effect of ventilation system on particle spatial distribution in ventilated rooms [4] A critical review [5] Indoor particles: a review [6] Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone [7] Why Is the Environment Indoors Important to Us? Indoor Environment Division [8] Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method [9] Floor-supply displacement ventilation in a small office [10] Floor-supply displacement ventilation for workshops [11] Numerical investigation of the swirling air diffuser: Parametric study and optimization [12] An experimental and numerical study on the effect of air terminal types on the performance of stratum ventilation [13] Prediction of thermal comfort, IAQ, and energy consumption in a dense occupancy environment with the under floor air distribution system [14] Effects of return air vent height on energy consumption, thermal comfort conditions and indoor air quality in an under floor air distribution system [15] Simplified model for desired airflow rate in underfloor air distribution (UFAD) systems [16] Air diffusion performance index (ADPI) of overhead-air-distribution at low cooling loads [17] A numerical airflow pattern study of a floor swirl diffuser for UFAD system [18] Comparison of diffusion characteristics of aerosol particles in different ventilated rooms by numerical method [19] Numerical analysis of the movement of biological particles in two adjacent rooms [20] Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering [21] An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response [22] Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow [23] ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [24] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy

تأثیر زاویه هوای ورودی از دریچه‌های چرخشی در سیستم توزیع هوای زیر سطحی بر الگوی پخش ذرات میکرونی

مرتضی طاهری MSc

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

مهدی افضلیان MSc

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سیدعلیرضا ذوالفقاری PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

حسن حسن‌زاده PhD

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

آلاینده‌های ذره‌ای در فضاهای داخلی تهدیدی جدی برای سلامتی انسان‌ها محسوب می‌شوند. از این رو شناخت، بررسی و کنترل پخش این ذرات در فضاهای داخلی امری ضروری است. در تحقیق حاضر تأثیر زاویه چرخش بر توزیع و پخش ذرات آلاینده با قید آسایش حرارتی در یک اتاق با دریچه چرخشی در یک سیستم تهویه زیر سطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای تحلیل جریان سیال و توزیع ذرات در فضای مورد نظر از توسعه حلگرهای این فوم در دیدگاه اویلری- لاگرانژی و از مدل دو نقطه‌ای گالیج برای بررسی شرایط آسایش حرارتی استفاده شده است. میدان جریان و توزیع ذرات با وجود دریچه چرخشی با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در هر سه حالت فوق، شاخص TSENS در ناحیه آسایش حرارتی قرار دارند. با این حال با تغییر زاویه چرخش از ۳۰ به ۶۰ می‌توان نارضایتی موضعی ناشی از اختلاف عمودی دما را به اندازه یک درجه سلسیوس کاهش داد. بررسی تغییر زاویه هوای ورودی نشان می‌دهند که در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه، درصد ذرات خارج شده با قطر ۲/۵ میکرومتر به ترتیب برابر ۳۲ و ۵۵٪ کل ذرات هستند. به عبارت دیگر، با افزایش زاویه هوای ورودی درصد بیش‌تری از ذرات اولیه داخل اتاق خارج می‌شوند و این رفتار مستقل از اندازه ذرات است. علاوه بر این با افزایش اندازه ذرات، ذرات بزرگ‌تر سریع‌تر از ناحیه تنفسی خارج شده و ذرات کوچک‌تر مدت زمان طولانی‌تری در هوا باقی می‌مانند، از این رو ذرات کوچک‌تر تأثیر بیش‌تری بر کیفیت هوای داخل دارند. **کلیدواژه‌ها:** آسایش حرارتی، پخش ذرات، دریچه چرخشی، کیفیت هوای داخل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

نویسنده مسئول: zolfaghari@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه افراد بیشتر وقت خود را در ساختمان‌ها و فضاهای بسته سپری می‌کنند، از این رو ارتقای سطح کیفیت هوای داخل (Indoor Air Quality; IAQ) تأثیر زیادی بر سلامت و کارایی آنها دارد. از این رو، بررسی کیفیت هوای داخل و تعیین میزان آلاینده‌ها و کنترل غلظت این آلاینده‌ها در ناحیه تنفسی افراد از اهمیت زیادی برخوردار است [1].

آلاینده‌های موجود در هوا را می‌توان به دو دسته گازها و ذرات تقسیم کرد [2]. گازها شامل دی‌اکسید کربن، رادون، ترکیبات آلی، بوها و غیره هستند که می‌توانند منشأ داخلی یا خارجی داشته باشند. آلاینده‌های ذره‌ای نیز می‌توانند منشأ داخلی یا خارجی داشته باشند و معمولاً به صورت غیریکنواخت در فضاها پخش می‌شوند، به همین دلیل کنترل آنها نسبت به آلاینده‌های گازی شکل مشکل‌تر است [3]. آلاینده‌های ذره‌ای تهدیدی جدی برای سلامتی محسوب می‌شوند و این موضوع، منحصر به فضاهای بیرون نبوده و غالباً غلظت ذرات آلاینده در فضاهای داخلی بیشتر از بیرون است [4-6]. نفوذ آلاینده‌های ذره‌ای از فضای بیرون به داخل و همچنین تولید آنها در فضاهای

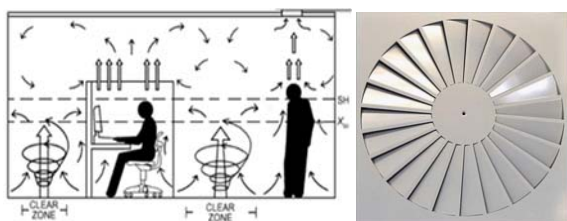
داخلی، منشأ وجود ذرات در فضاهای داخلی هستند. تأثیر آلاینده‌های ذره‌ای بر سلامت انسان شامل تحریک چشم، بینی و گلو، بیماری‌های تنفسی و مرگ زودرس ناشی از تشدید بیماری‌های قلبی در افراد مبتلا به بیماری‌های قلبی است.

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که اندازه ذرات تأثیر مستقیمی بر سلامت افراد دارند و ذرات کوچک‌تر (با قطر کمتر از ۱۰ میکرومتر) می‌توانند حتی از طریق ریه وارد خون شده [7] و سلامت افراد را تهدید کنند. از این رو امروزه بررسی غلظت ذرات آلاینده در فضاهای داخلی از موضوعات مهم مورد بحث پژوهشگران محسوب می‌شود.

تهویه، یکی از روش‌های رایج جهت کنترل کیفیت هوای داخل محسوب می‌شود؛ زیرا از این طریق می‌توان غلظت آلاینده‌های هوا در فضاهای داخلی که گاهی ۲ تا ۵ برابر و گاهی تا ۱۰۰ برابر بیشتر از فضای خارجی است را کاهش داد [7]. انتقال و پخش آلاینده‌های ذره‌ای در محیط‌های تهویه‌شده به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به الگوی جریان، نوع ذرات، هندسه فضا، نوع سیستم تهویه و نرخ تعویض هوا و جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی اشاره کرد [8]. بنابراین بررسی تأثیر نوع سیستم تهویه مطبوع در چگونگی توزیع و ته‌نشینی آلاینده‌های ذره‌ای، به خصوص ذرات ایروسول (Aerosol) با قطر ۲/۵ تا ۱۰ میکرومتر، به عنوان یکی از آلاینده‌های مؤثر بر سلامتی افراد، امری ضروری است.

یکی از سیستم‌های تهویه مطبوع رایج در جهان، سیستم توزیع هوای زیرسطحی (Under Floor Air Distribution; UFAD) است. این سیستم به علت تأمین شرایط مطلوب در ناحیه حضور افراد و خروج مناسب هوای گرم و آلوده به سمت بالای فضای تهویه‌شده، نسبت به دیگر سیستم تهویه بالاسری از محبوبیت بیشتری برخوردار است. در حضور این سیستم، اتاق به دو ناحیه بالا و پایین تقسیم می‌شود. در ناحیه پایین (ناحیه نزدیک به کف) به علت اغتشاشات هوا، اختلاط جریان شدیدتر است؛ ولی در نواحی بالاتر، سرعت متوسط هوا کم‌تر و هوا گرم‌تر و آلوده‌تر است. از ویژگی‌های دیگر این سیستم، تقسیم فضا به لایه‌های متفاوت دمایی است که تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم تهویه و به خصوص بر شاخص اثربخشی نسبی تهویه آن دارد.

عوامل متعددی بر عملکرد این سیستم تأثیرگذار است، از آن جمله می‌توان به جانمایی دریچه ورود و خروج هوا، دما و نرخ تعویض هوا، تعداد و چیدمان دریچه‌ها و نوع دریچه اشاره کرد. دریچه چرخشی یکی از دریچه‌های مرسوم برای سیستم‌های تهویه به خصوص سیستم توزیع هوای زیرسطحی است. الگوی هوای چرخشی باعث اختلاط بیشتر و سریع‌تر هوای ورودی با هوای موجود در فضا شده و باعث افزایش ارتفاع ناحیه تأثیر می‌شود. لذا در پژوهش حاضر تأثیر زاویه هوای ورودی از دریچه چرخشی بر الگوی جریان هوا، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل با تکیه بر پخش ذرات آلاینده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ نمونه‌ای از دریچه‌های چرخشی معمول و مورد استفاده و همچنین جریان ایجادشده بر اساس این نوع دریچه در یک اتاق نشان داده شده است.



شکل ۱) شکل دریچه چرخشی و جریان ایجادشده در یک اتاق

مختلف در نظر گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در ارتفاع یکسان برای دریچه برگشتی، دریچه ورودی چرخشی نسبت به مستقیم اختلاف عمودی دمایی کمتری را ایجاد می‌کند. همچنین با فرض استفاده از هوای برگشتی، مصرف انرژی در دریچه‌های مستقیم نسبت به دریچه‌های چرخشی بیشتر است. همچنین قرارگیری دریچه خروجی در ارتفاع‌های مختلف، باعث تغییر درصد نارضایتی حرارتی و زمان ماندگاری هوا (یا عمر متوسط هوا به عنوان معیاری برای سنجش کیفیت هوای داخل) می‌شود. به طوری که در ارتفاع ۰/۱ متری از کف، دریچه ورودی چرخشی نسبت به مستقیم باعث افزایش درصد نارضایتی حرارتی و همچنین افزایش تقریباً ۳۵٪ زمان متوسط ماندگاری هوا در ارتفاع ۱/۱ متری از کف می‌شود که وضعیت مطلوبی را نشان نمی‌دهد.

حیدری‌نژاد و همکاران^[14] به بررسی شرایط آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی سیستم توزیع هوای زیرسطحی با دریچه چرخشی در یک اتاق پرداختند. در تحقیق ایشان، تأثیر جانمایی دریچه برگشت در ۴ حالت (ارتفاع ۰/۳، ۰/۶۵، ۱/۳ و ۲ متری از کف) و زاویه ورود هوا (۳۰، ۴۵ و ۶۰) از دریچه چرخشی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در کلیه حالت‌های محل قرارگیری دریچه برگشتی، با افزایش زاویه ورود هوا از دریچه چرخشی، درصد نارضایتی حرارتی افزایش می‌یابد. به طوری که برای زاویه ۶۰ درجه برای تمامی حالت‌های محل دریچه برگشتی این درصد در ناحیه حضور افراد بیشتر از میزان استاندارد (۱۵٪) می‌باشد.

ژانگ و همکاران^[15] به صورت آزمایشگاهی به بررسی توزیع لایه‌ای هوا در یک اتاق مجهز به سیستم توزیع هوای زیرسطحی پرداختند. سیستم توزیع هوای زیرسطحی، زیرمجموعه سیستم‌های کاملاً لایه‌ای است و این لایه‌لایه شدن تأثیر زیادی بر آسایش افراد، نارضایتی‌های حرارتی موضعی و حتی مصرف انرژی دارد. لذا در تحقیق ایشان، سیستم توزیع هوای زیرسطحی با ۳ نوع دریچه چرخشی (Swirl Diffuser)، صفحات مشبک و ورودی نواری (Grille Diffuser) مورد آزمایش قرار گرفته و با استفاده از روابط موجود و اصلاح آنها، شرایط توزیع دمایی و نتایج آن مورد بحث قرار گرفته است.

لئو و همکاران^[16] به بررسی شرایط یک اتاق مجهز به سیستم توزیع هوای بالاسری با ۱۵ نوع دریچه ورودی به صورت آزمایشگاهی پرداختند. در این آزمایش دریچه‌های مختلفی مانند چرخشی، مشبک، سقفی دایره‌ای، سقفی مربعی و نواری تحت دو بار سرمایشی (۲۵ و ۵۰ وات بر متر مربع) مورد آزمایش قرار گرفته و بر اساس شاخص عملکرد پخش هوا (ADPI) مقایسه و تحلیل صورت گرفته است. در نهایت جدولی بر اساس نوع دریچه‌ها و شاخص عملکرد پخش هوا ارائه و نتایج موجود در استاندارد/شرایط به‌روزرسانی شد.

یائو و همکاران^[17] در تحقیقی عملکرد سیستم توزیع هوای زیرسطحی با دریچه چرخشی را به ۲ روش دینامیک سیالات محاسباتی و آزمایشگاهی و تأثیر عوامل مختلفی مانند (دبی هوای ورودی، تعداد و زاویه پره‌های ورودی چرخشی) بر توزیع دما و سرعت را بررسی کردند. در بخشی از این تحقیق دریچه چرخشی با تعداد پره‌های مختلف (۱۲، ۱۸ و ۲۴) ولی دبی یکسان مورد ارزیابی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده بین حالت‌های فوق دو مورد ۱۲ و ۲۴ پره، رفتاری شبیه دریچه‌های مستقیم داشته و اثر چرخش جریان در آنها ناچیز است. لذا دریچه چرخشی با تعداد ۱۸ پره، حالت بهینه است.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده روی انواع دریچه‌ها و اهمیت کیفیت هوای داخل، لزوم بررسی تأثیر زاویه هوای ورودی از دریچه‌های

پژوهش‌های متعددی روی انواع دریچه‌های ورودی و تأثیر آنها بر الگوی جریان، توزیع دما، آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی انجام شده است که در اینجا به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

کوبایاشی و چن^[9] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شرایط یک اتاق مجهز به سیستم تهویه جابه‌جایی با دریچه چرخشی را بررسی و با داده‌های تجربی مقایسه کردند. در تحقیق مذکور، تأثیر عواملی مانند نرخ تعویض هوا، دمای ورودی، تعداد دریچه‌ها، نحوه چیدمان لوازم بر توزیع دما، گونه و شرایط آسایشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزایش تعداد دریچه‌ها (با ثابت ماندن نرخ تعویض هوا)، سرعت هوای ورودی کاهش می‌یابد. این در حالی است که در شرایط وجود یک دریچه، زمان ماندگاری هوا بیشتر بوده و در نتیجه، برای دستیابی به بهترین شرایط، بایستی تعداد دریچه‌های ورودی و سرعت هوا از آنها بهینه باشد.

لائو و چن^[10] به بررسی عددی شرایط آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل یک محیط کارگاهی با ۲ دریچه چرخشی و صفحات مشبک (Perforated Tiles) با سیستم تهویه جابه‌جایی پرداخته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از دریچه چرخشی باعث کاهش تغییرات دمای لایه‌های هوا در ارتفاع شده و این حالت وضعیت مطلوب‌تری از نظر آسایش حرارتی در محیط کارگاهی حاکم می‌شود.

سجادی و همکاران^[11] به بررسی عملکرد یک سیستم اختلاطی با ورودی چرخشی در یک اتاق پرداختند. در این تحقیق، پارامتر بدون بعدی به نام زمان تخلیه تعریف شده است که هر چه مقدار آن کوچک‌تر باشد، عملکرد سیستم بهتر و اختلاط هوا کامل‌تر صورت می‌گیرد. بر اساس این نتایج، با تغییر زاویه در محدوده ۳۰ تا ۳۵ درجه، تغییرات نتایج قابل توجه بوده و در زاویه ۳۲ درجه زمان تخلیه کمترین مقدار است.

یائو و لین^[12] به بررسی تغییر نوع دریچه ورودی بر عملکرد سیستم لایه‌ای به دو صورت عددی و آزمایشگاهی پرداختند. در تحقیق مذکور، عواملی مانند الگوی جریان هوا، توزیع دما، احساس حرارتی، زمان متوسط ماندگاری هوا و غلظت گونه دی‌اکسید کربن، برای ۴ نوع دریچه ورودی انتخابی دایره‌ای (Circular Diffusers)، مربعی (Square Diffusers)، مشبک و دریچه‌های دوطرفه (Double Deflection Grilles) در یک کلاس درس مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بهترین نوع دریچه از نظر تأمین شرایط آسایش حرارتی و همچنین کیفیت هوای مطلوب، دریچه دایره‌ای است. از نظر شرایط آسایش حرارتی این نوع دریچه ضمن ایجاد شرایط یکنواخت‌تر، شرایط مطلوب (قرارگیری در محدوده آسایش حرارتی) را تأمین می‌کند. این در حالی است که برای دریچه دوطرفه شرایط نزدیک به سرما گزارش شده است. مقدار گزارش‌شده برای شاخص زمان متوسط ماندگاری هوای دریچه دایره‌ای اگرچه بیشتر از ۳ نوع دریچه دیگر است، ولی باز هم در محدوده مجاز است. همچنین غلظت دی‌اکسید کربن در ناحیه تنفسی برای تمامی حالات دریچه‌های به‌کاررفته کمتر از حد مجاز بوده و برای دریچه دایره‌ای کمترین مقدار است. لذا این دریچه از نظر شرایط کیفیت هوای داخل، وضعیت مطلوبی را ایجاد کرده است.

فتح‌الله‌زاده و همکاران^[13] به بررسی شرایط آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی در یک مکان پرجمعیت پرداختند. ایشان جانمایی دریچه‌های ورودی را در زیر صندلی افراد و به دو صورت مستقیم و چرخشی و جانمایی دریچه برگشت را در ارتفاع‌های

۳-۱- معادلات حاکم بر جریان همراه با انتقال حرارت

به دلیل نیاز به بررسی انتقال حرارت و جرم، لازم است که معادلات پیوستگی، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها در فضای نمونه حل شوند. جهت اختصار، معادلات حاکم به فرم کلی زیر بیان شده‌اند. معادلات حاکم بر جریان غیرقابل تراکم، پایا و با خواص ثابت به صورت رابطه زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

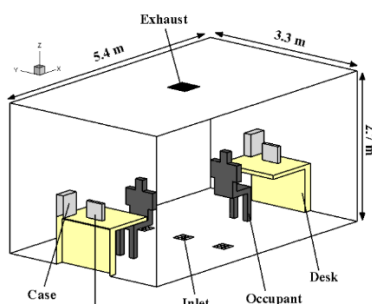
مقادیر پارامترهای ϕ ، S_ϕ و Γ_ϕ برای هر یک از معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، با توجه به آشفته بودن جریان، از مدل اغتشاشی $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است.

جدول ۱) مقادیر ضرایب و ترم چشمه در معادله ۱

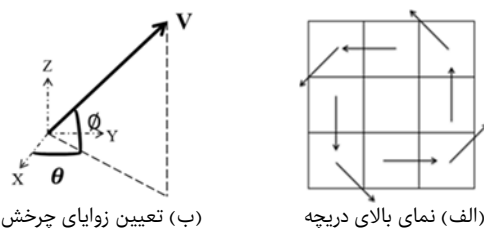
نام معادله	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
پیوستگی	1	0	0
مومنتوم	u_i	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_i \beta (T - T_{ref})$
بقای انرژی	T	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$	0

۳-۲- معادلات مربوط به مدل آسایش گایج

تاریخچه ارائه مدل‌های تحلیل آسایش حرارتی، به تحقیقات فنگر [20] در سال ۱۹۷۰ بازمی‌گردد. پس از مدل فنگر، مدل دیگری که بیشتر مورد توجه قرار گرفته، مدل دوتقطه‌ای گایج [21] است که در سال ۱۹۸۶ ارائه شده است. مدل گایج یک مدل گذرا و بر مبنای تعادل حرارتی بین بدن و محیط بوده و برخی از پاسخ‌های فیزیولوژیکی و تطبیقی بدن مانند لرز هنگام سرما یا انبساط و انقباض عروق با تغییر شرایط حرارتی محیط اطراف و همچنین تبخیر از سطح بدن و تعرق در آن لحاظ شده است. در این مدل، بدن به صورت ۲ استوانه هم‌مرکز فرض شده که استوانه داخلی شامل مرکز بدن (چربی، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) و استوانه خارجی شامل پوست است. در این مدل از انتقال حرارت هدایت بدن و محیط صرف نظر شده و لباس به صورت یک پوشش یکدست روی تمام سطح بدن فرض شده است.



شکل ۲) فضای نمونه



(ب) تعیین زوایای چرخش

(الف) نمای بالای دریچه

شکل ۳) مدل‌سازی دریچه ورودی هوای چرخشی

معادلات موازنه انرژی برای مرکز و پوست بدن در این مدل به صورت روابط ۲ و ۳ بیان شده‌اند.

چرخشی بر پخش ذرات آلاینده شکل می‌گیرد. همچنین هرچند مطالعات متعددی در زمینه توزیع و ته‌نشینی ذرات داخلی انجام شده است، اما روش مناسبی برای ارزیابی ته‌نشینی و توزیع ذرات در شرایط مختلف تهویه ارائه نشده است. بنابراین هدف پژوهش حاضر تحلیل الگوی جریان هوا و پخش ذرات در یک اتاق با تغییر زاویه ورود هوای دریچه چرخشی است. در این راستا ۳ زاویه هوای ورودی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه برای دریچه‌های چرخشی کفی در نظر گرفته شده و پخش و ته‌نشینی ذرات آلاینده دارای قطر ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر همراه با شرایط آسایش حرارتی در فضای نمونه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فضای نمونه و ابزار تحقیق

در این تحقیق، برای ایجاد شبکه از نرم‌افزار سالوم استفاده شده است. فضای نمونه در نظر گرفته شده، یک اتاق اداری به حجم ۴۸m³ است و مطابق شکل ۲، دو نفر همراه با میز و رایانه در آن قرار دارند. دیوارها، سقف و کف اتاق عایق در نظر گرفته شده‌اند. افراد واقع در اتاق در وضعیت نشسته قرار داشته و در حال یک فعالیت معمول با نرخ متابولیک ۱met یا ۵۸/۱۵W/m² هستند. رطوبت نسبی فضا ۵۰٪ و مقاومت پوشش لباس افراد بر اساس پوشش رسمی مانند کت و شلوار، برابر ۱clo فرض شده است.

ضمن اینکه یک دریچه خروجی به مساحت ۰/۱۶m² در سقف و ۳ دریچه ورودی هوای چرخشی در کف اتاق تعبیه شده است. هوای ورودی با دمای ۱۷°C و با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و با سرعت ۰/۶m/s وارد اتاق می‌شوند. مطابق برخی از تحقیقات پیشین [9, 10] و برای مدل‌سازی دریچه ورودی چرخشی، هر دریچه به ۹ مربع کوچک تقسیم می‌شود. مربع مرکز به صورت یک دیواره و فاقد سرعت تعریف می‌شود. سرعت ۸ مربع اطراف مانند شکل ۳- الف در جهات و زوایای مختلف در نظر گرفته شده است. همچنین، در شکل ۳- ب، توزیع سرعت روی یکی از ۸ مربع دریچه چرخشی نشان داده شده است. سرعت در سه راستای X، Y و Z به ترتیب برابر است با:

$$V = V_x \hat{i} + V_y \hat{j} + V_z \hat{k}$$

$$V_x = V \cos \phi \cos \theta$$

$$V_y = V \cos \phi \sin \theta$$

$$V_z = V \sin \phi$$

که زاویه ϕ و θ به ترتیب زاویه سرعت ورودی نسبت به افق و نسبت به محور X است. در این تحقیق زاویه ϕ زاویه چرخش در نظر گرفته شده است که سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است. زاویه θ نیز برای این سه حالت ثابت و برابر ۴۵ درجه فرض شده است.

جهت مدل‌سازی ذرات فرض می‌شود که ذرات در فضای اتاق با توزیع اولیه یکنواخت وجود داشته و در ابتدا دارای سرعت صفر باشند و سپس، تحت تأثیر جریان داخل اتاق شروع به حرکت کنند. از اثر ذرات بر جریان هوا و همچنین اثر ذرات بر یکدیگر صرف نظر شده است. بر این اساس، 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 [8, 18, 19].

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل سه بخش معادلات مربوط به جریان و انتقال حرارت، معادلات مربوط به احساس حرارتی افراد و نهایتاً معادلات مربوط به پخش ذرات می‌باشند.

$$Re_p = \rho d_p (u_p - u) / \mu \quad (12)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{1}{6} Re_p^2 / 3 \right); & Re_p \leq 1000 \\ 0.424 & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (13)$$

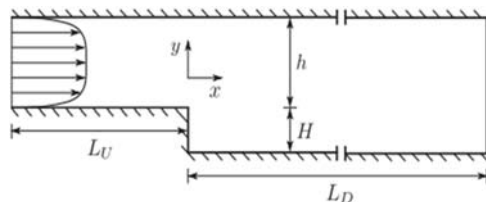
برآیند نیروهای شناوری و گرانش توسط رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود.

$$F_B + F_G = \frac{(\rho_p - \rho) \pi d_p^3}{6} g \quad (14)$$

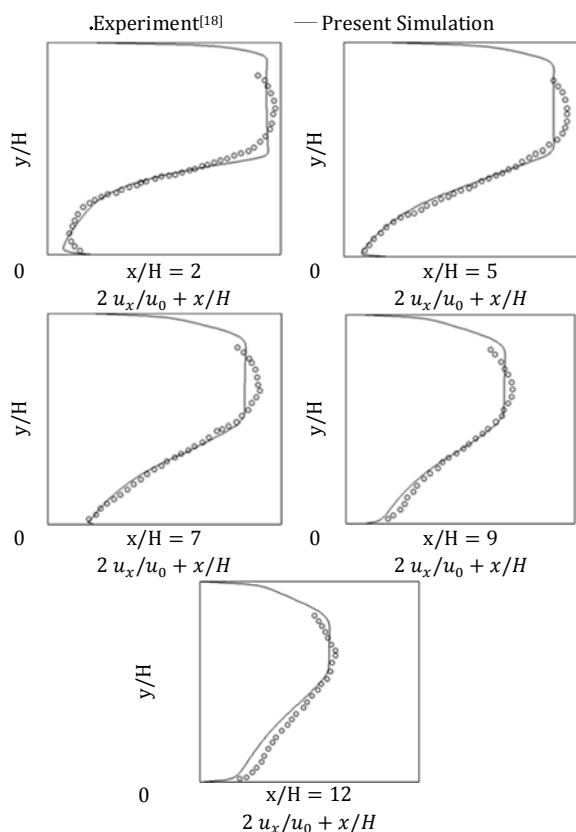
۴- اعتبارسنجی

هندسه پله پس‌رو (Backward-Facing Step) یک هندسه معمول مورد استفاده برای اعتبارسنجی جریان آشسته همراه با فاز پراکنده در آن است و چندین مطالعه آزمایشگاهی و عددی برای جریان حامل ذرات در هندسه پله پس‌رو وجود دارد. مطابق شکل ۴ در هندسه پله پس‌رو h و H به ترتیب دارای مقادیر ۰/۴ متر و ۰/۲۶۷ متر هستند که $L_U = 10h$ و $L_D = 35h$ می‌باشند. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود، از این هندسه به منظور اعتبارسنجی کد عددی حاضر استفاده شده است.

همان‌طور که در نمودارهای ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، هم‌خوانی نسبتاً مناسبی بین نمودارهای توزیع سرعت جریان هوا و توزیع ذرات در پله پس‌رو با نتایج تجربی فسلر و یاتون^[22] وجود دارد که این امر نشان‌دهنده صحت و قابل قبول بودن مدل‌سازی حاضر است.



شکل ۴) هندسه پله پس‌رو



نمودار ۱) مقایسه توزیع سرعت جریان سیال شبیه‌سازی‌شده با داده‌های تجربی^[22]

$$\frac{(1-\alpha)m_p C_{p,b}}{A_D} \frac{dT_{cr}}{dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr-sk} \quad (2)$$

$$\frac{\alpha m_b C_{p,b}}{A_D} \frac{dT_{sk}}{dt} = Q_{cr-sk} - (Q_{eva} + Q_{conv} + Q_{rad}) \quad (3)$$

که در این روابط T_{sk} و T_{cr} به ترتیب دمای مرکز بدن و سطح پوست بر حسب درجه سلسیوس می‌باشند. A_D مساحت دوبویز است که نشان‌دهنده سطح بدن در شرایط بدون لباس است و طبق دست‌نامه اشری^[2] برای شخص استاندارد این مقدار برابر ۱/۸ مترمربع در نظر گرفته شده است. همچنین Q_{res} نشان‌دهنده انتقال حرارت از طریق تنفس، $Q_{conv} + Q_{rad}$ انتقال حرارت محسوس بین بدن و محیط اطراف از طریق جابه‌جایی و تابش و Q_{eva} انتقال حرارت نهان از بدن بر اثر تبخیر است.

در نهایت مدل دونقطه‌ای گایج برای بیان احساس حرارتی افراد شاخص بدون بعد TSENS را ارائه می‌کند. در این شاخص دامنه احساس حرارتی بین ۵+ تا ۵- در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ۵- بیانگر سرمای غیرقابل تحمل، ۴- خیلی سرد، ۳- سرد، ۲- خنک، ۱- کمی خنک، ۰ خنثی، ۱+ کمی گرم، ۲+ گرم، ۳+ داغ، ۴+ خیلی داغ و ۵+ نیز بیانگر گرمای غیرقابل تحمل است. محدوده مطلوب آسایشی نیز در این معیار بین ۰/۵+ تا ۰/۵- می‌باشد. مقدار این شاخص آسایشی از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) \\ 4.7\eta_{ev}(T_b - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) \\ 4.7\eta_{ev} + 0.4685(T_h - T_{b,h}) \end{cases} \quad (4)$$

که در این رابطه η_{ev} بازدهی تبخیری است که برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر $T_{b,h}$ و $T_{b,c}$ از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند:

$$T_{b,c} = 0.0033(M - W) + 36.301 \quad (5)$$

$$T_{b,h} = 0.0060(M - W) + 36.669 \quad (6)$$

۳-۳ معادلات مربوط به پخش ذرات

برای به‌دست‌آوردن موقعیت و سرعت ذرات در فضا، از قانون دوم نیوتن استفاده می‌شود.

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \quad (7)$$

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \sum F_i \quad (8)$$

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 خارجی وارد بر هر ذره است.

$$\sum F_i = F_D + F_B + F_G \quad (9)$$

که F_D نیروی درگ، F_B نیروی شناوری و F_G نیروی ناشی از گرانش است. این نیروها، تأثیر بیشتری نسبت به سایر نیروهای وارد بر ذرات دارند^[15]. نیروی درگ توسط رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$F_D = \frac{1}{2} C_C \frac{3}{4} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{m_p}{d_p} C_D (u - u_p) |u - u_p| \quad (10)$$

که d_p قطر هر ذره است. C_C ضریب تصحیح کانینگهام است که از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

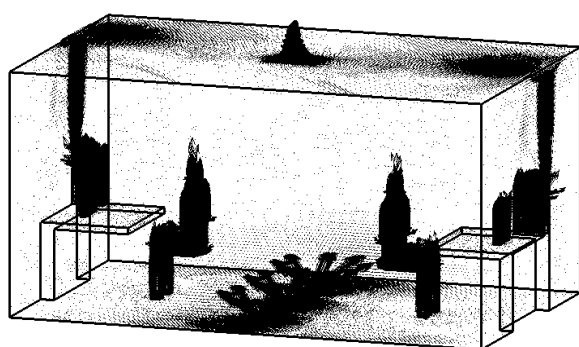
$$C_C = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{-1.1d_p/2\lambda}) \quad (11)$$

این ضریب با توجه به اندازه ذره و عدد نادسن ($\frac{2\lambda}{d_p}$) محاسبه شده و در خارج از محدوده محیط پیوسته به کار می‌رود. با توجه به اندازه ذرات به‌کاررفته، در پژوهش حاضر این ضریب مساوی یک در نظر گرفته شده است.

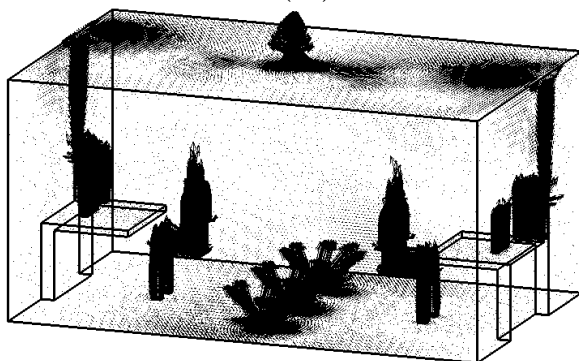
ضریب درگ (C_D) توسط یک تابع غیرخطی محاسبه می‌شود که وابسته به عدد رینولدز ذرات است و توسط روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند:

دما در این ناحیه برای زاویه ۳۰ درجه برابر ۱۸/۹ درجه سلسیوس و برای زاویه ۶۰ درجه به ۱۸/۱ درجه سلسیوس کاهش یافته است. در شکل ۷ توزیع سرعت در صفحه میانی اتاق و در نمودار ۴ نیز میانگین سرعت در ناحیه حضور افراد نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ در بیشتر ناحیه حضور افراد سرعت هوا بسیار کم (کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه) است در حالی که سرعت در نواحی نزدیک به دریچه ورودی نسبت به بقیه نواحی خیلی بیشتر است. به همین دلیل در نواحی نزدیک به دریچه ورودی (نه کل این ناحیه) امکان ایجاد ناراضایتی حرارتی ناشی از کوران وجود دارد.

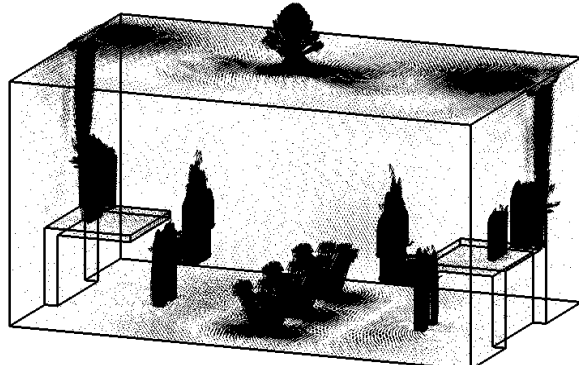
در شکل ۸ توزیع شاخص آسایش حرارتی (TSENS) در صفحه میانی اتاق نشان داده شده است. به دلیل سرعت کم هوا در اکثر نقاط اتاق، توزیع شاخص آسایش حرارتی بیشتر متأثر از توزیع دما در اتاق بوده و از توزیع لایه‌ای تبعیت می‌کند. به دلیل قرارگیری دریچه‌های ورودی در کف و حضور هوای سرد در ناحیه پایین اتاق، کمترین مقدار شاخص آسایش حرارتی در ناحیه نزدیک به کف (پای افراد) قرار دارد. شاخص آسایش حرارتی در هر سه حالت مورد نظر نزدیک به شرایط ناراضایتی و سرمای‌ش قرار دارد.



۳۰ (الف)

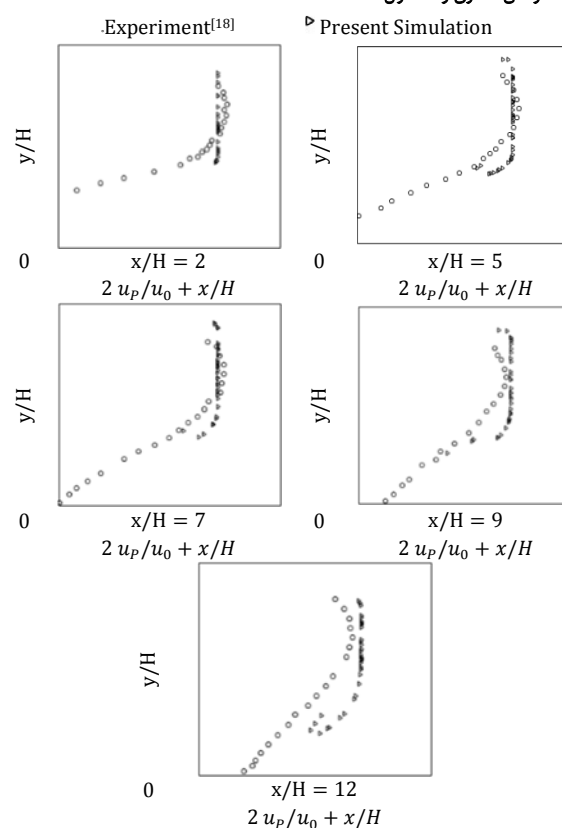


۴۵ (ب)



۶۰ (ج)

شکل ۵ بردارهای سرعت در اتاق به ازای زوایای چرخش (الف) ۳۰ (ب) ۴۵ و (ج) ۶۰ درجه



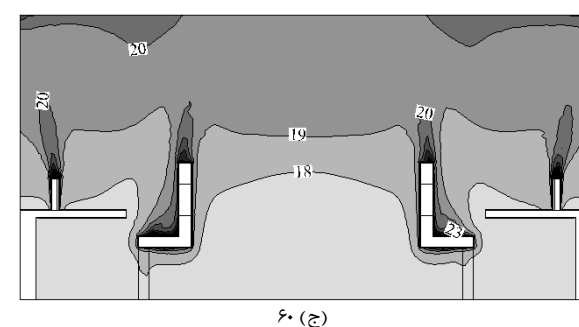
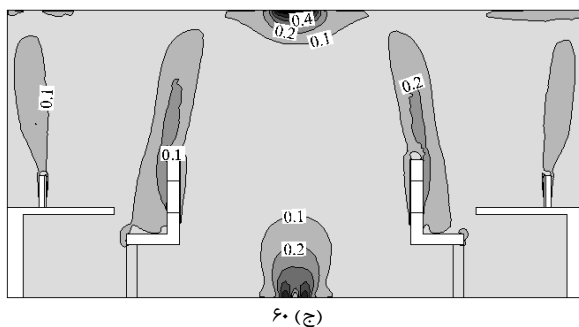
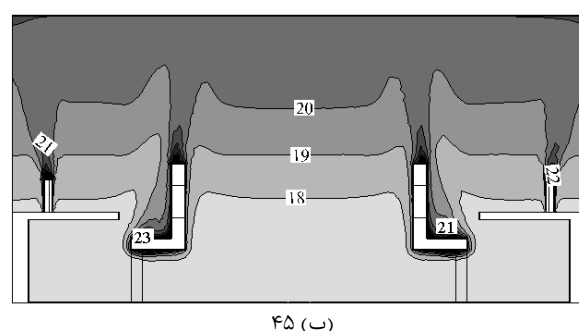
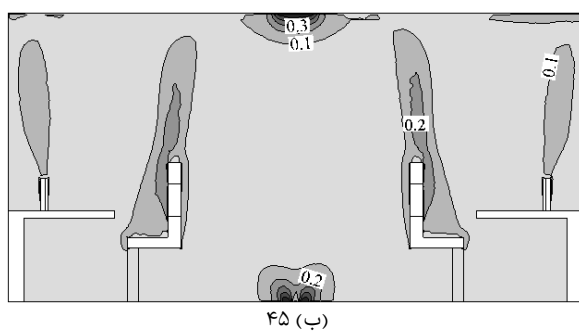
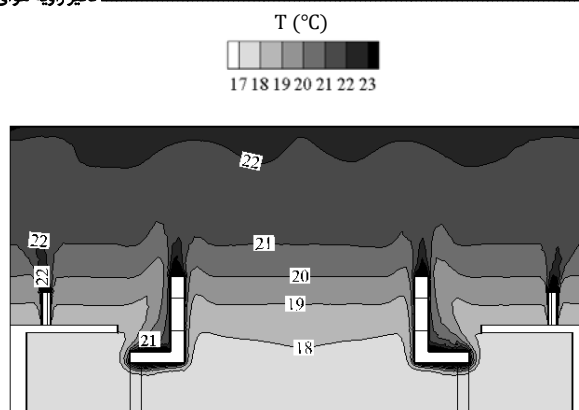
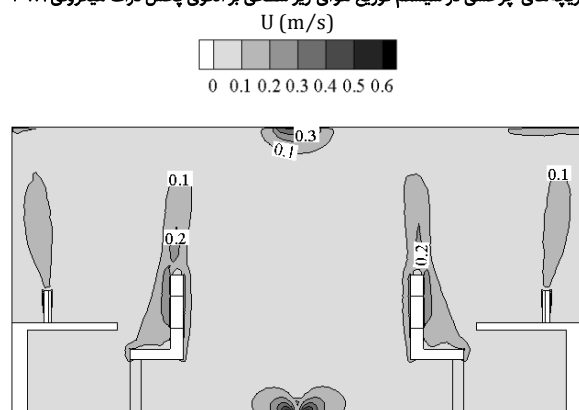
نمودار ۲) مقایسه توزیع سرعت ذرات شبیه‌سازی شده با داده‌های تجربی [22]

۵- استقلال حل از شبکه

برای حل مسئله از یک شبکه‌بندی غیرسازمان‌یافته استفاده شده است. به دلیل گرادین شدید کمیت‌ها در نزدیکی دریچه‌های ورودی و خروجی و نیز مجاورت منابع‌های حرارتی مانند رایانه و انسان‌ها، 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 ۸۲۳۵۸۷، ۱۶۰۸۴۶۱ و ۲۹۹۰۴۰۲ گره حل شده است. بر اساس توزیع سرعت و دمای استخراج شده برای شبکه‌هایی با تعداد ۱۶۰۸۴۶۱ و ۲۹۹۰۴۰۲ نتایج نشان می‌دهند که تغییر چندانی بین آنها وجود ندارد. لذا از شبکه‌ای با ۱۶۰۸۴۶۱ گره به عنوان شبکه مناسب حل استفاده شده است.

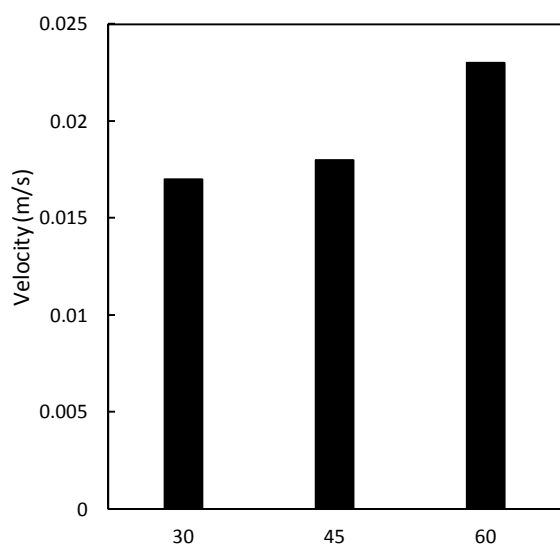
۶- نتایج

در ابتدا برای نشان دادن نحوه چرخش هوای دریچه ورودی توزیع سرعت به صورت سه‌بعدی و توسط بردارهایی نشان داده می‌شود. این توزیع در شکل ۵ ارائه شده است. در ادامه تأثیر زاویه دریچه چرخشی بر آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل، توزیع دما و سرعت در اتاق مورد بحث قرار می‌گیرد. در شکل ۶ توزیع دما در سه حالت نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در هر ۳ زاویه چرخش، تغییرات این کمیت‌ها به صورت لایه‌ای است که این موضوع، یکی از مشخصه‌های سیستم تهویه توزیع هوای زیرسطحی محسوب می‌شود. مطابق شکل با افزایش زاویه چرخش هوا، مؤلفه عمودی سرعت افزایش یافته است که این باعث توزیع یکنواخت‌تر سرعت می‌شود. همچنین، مطابق نمودار ۳ با افزایش زاویه چرخش هوا، توزیع دما در اتاق یکنواخت‌تر شده است. به علاوه با افزایش زاویه چرخش، متوسط دمای هوا در ناحیه افراد (ناحیه‌ای از کف تا ارتفاع ۱/۸ متری اتاق) اندکی کاهش یافته است؛ به طوری که متوسط

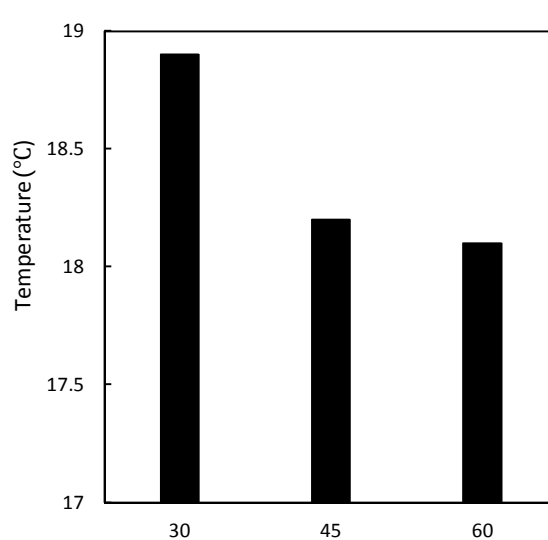


شکل ۷) توزیع سرعت در صفحه وسط اتاق

شکل ۶) توزیع دما در صفحه وسط اتاق



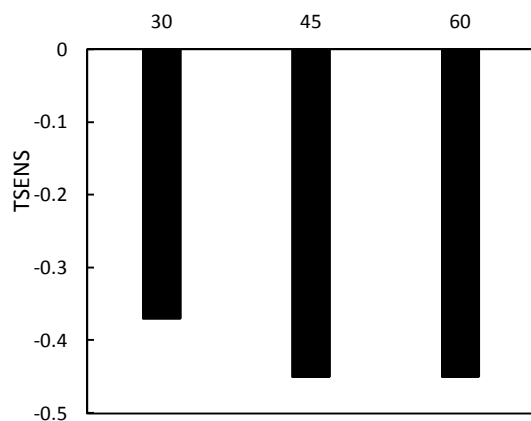
نمودار ۴) سرعت میانگین در ناحیه حضور افراد



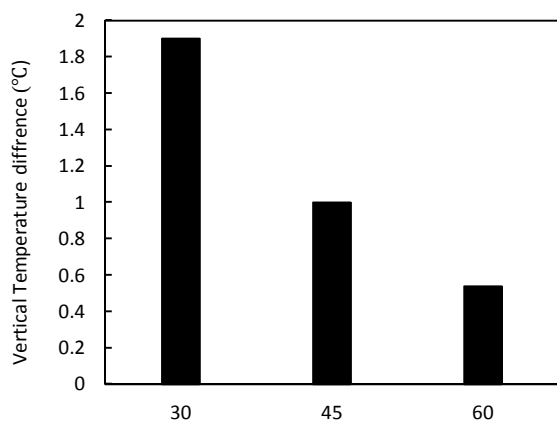
نمودار ۳) دمای میانگین در ناحیه حضور افراد

ترتیب برابر ۱، ۱/۹ و ۰/۵ هستند که با وجود اختلاف، در هر سه حالت در محدوده مجاز قرار دارند.

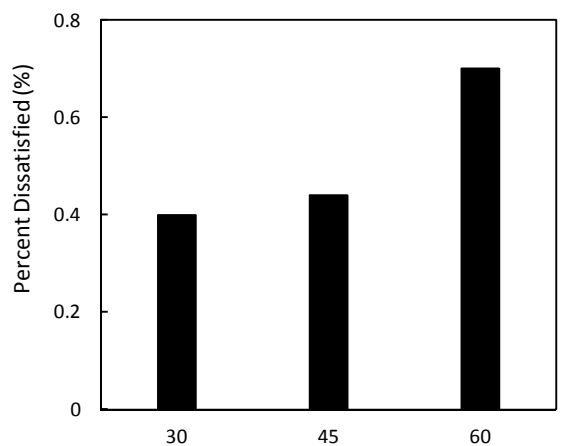
برای محاسبه نارضایتی حرارتی موضعی ناشی از کوران، از رابطه فنگر استفاده می‌شود^[2]. نارضایتی ناشی از کوران بر حسب درصد بیان شده و وابسته به سرعت، دمای هوا و شدت اغتشاشات جریان هوا می‌باشد. بر اساس استاندارد ۵۵ اشری، مقدار این شاخص باید کمتر از ۲۰٪ باشد^[24]. درصد نارضایتی ناشی از کوران برای سه حالت زاویه چرخش در نمودار ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به دلیل سرعت کم هوا در ناحیه حضور افراد، نارضایتی ناشی از کوران نیز در این ناحیه بسیار کم است.



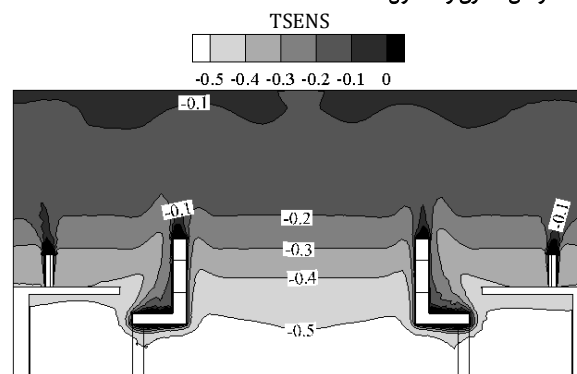
نمودار ۵) شاخص آسایش حرارتی میانگین در ناحیه حضور افراد



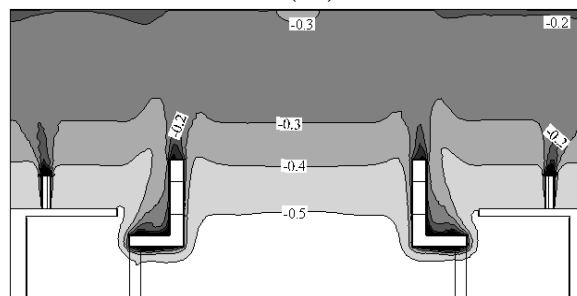
نمودار ۶) اختلاف عمودی دما برای حالات مورد بررسی



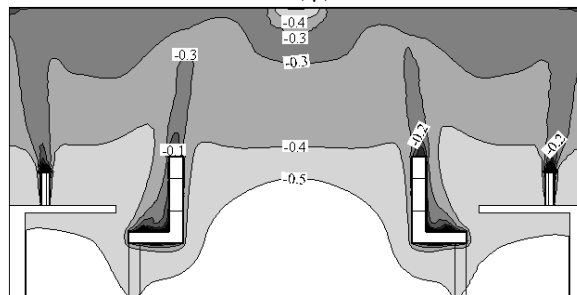
نمودار ۷) درصد نارضایتی کوران در ناحیه حضور افراد



۳۰ (الف)



۴۵ (ب)



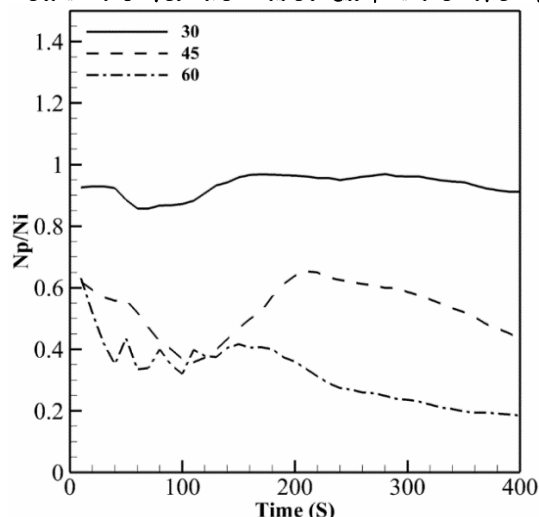
۶۰ (ج)

شکل ۸) توزیع آسایش حرارتی در صفحه وسط اتاق

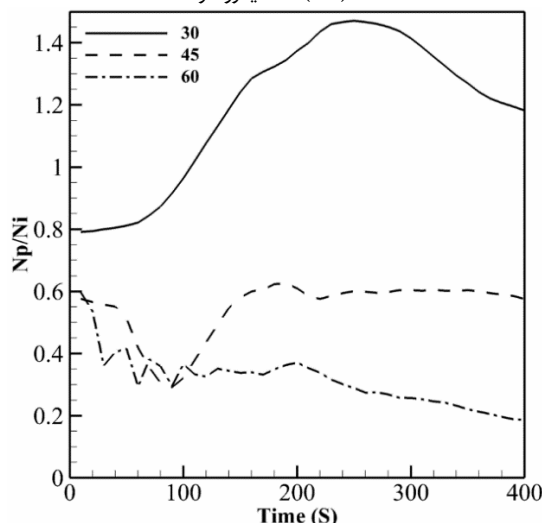
در نمودار ۵ متوسط شاخص آسایش حرارتی در ناحیه حضور افراد نشان داده شده است. مقدار این شاخص برای سه حالت زاویه چرخش ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۳۷، ۰/۴۵ و ۰/۴۵ هستند که در هر سه حالت نزدیک به احساس سرما ولی در محدوده مجاز و آسایش حرارتی قرار دارند. مطابق با آنچه در بخش توزیع دما و همچنین دمای میانگین برای سه حالت زاویه چرخش گفته شد، شاخص آسایش حرارتی برای زاویه ۳۰ درجه، اندکی به شرایط خنثی نزدیک‌تر است.

قرارگرفتن شاخص‌های آسایش حرارتی در محدوده‌های مجاز، شرط لازم و نه کافی برای قابل قبول بودن شرایط آسایش حرارتی از سوی افراد است. لذا لازم است در کنار شاخص آسایش حرارتی، عوامل نارضایتی حرارتی موضعی نیز مورد بررسی قرار گیرند. از این رو، در این تحقیق علاوه بر بررسی شاخص آسایش حرارتی دو عامل نارضایتی حرارتی موضعی کوران و اختلاف عمودی دما نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

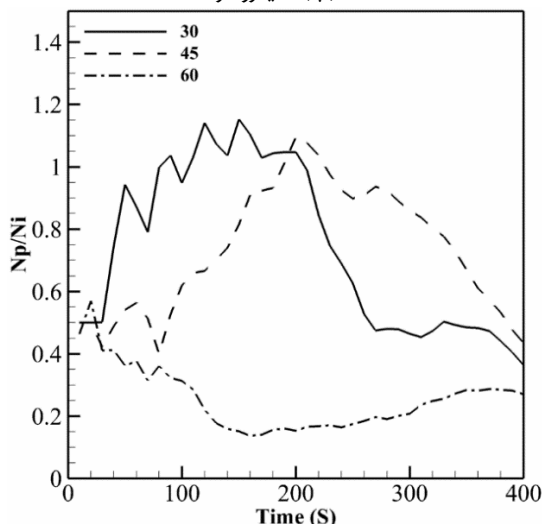
اختلاف عمودی دما، یکی از عوامل ایجاد نارضایتی حرارتی است که به صورت اختلاف دمای هوا در فاصله مچ پا (۱/۱ متر) تا سر (۱/۱ متر) تعریف می‌شود و برای فضاهای داخلی، بیشینه مجاز آن ۳ درجه سلسیوس است^[23]. در نمودار ۶ اختلاف عمودی دما برای سه زاویه چرخش در پیچ ورودی مورد بررسی نشان داده شده است. اختلاف دمای عمودی برای سه حالت زاویه چرخش ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به



(الف) ۲/۵ میکرومتر



(ب) ۵ میکرومتر



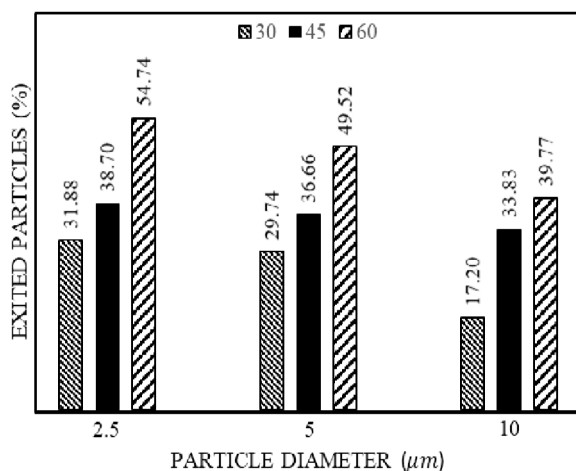
(ج) ۱۰ میکرومتر

نمودار ۹ نسبت تعداد ذرات موجود در ناحیه تنفسی به تعداد اولیه ذرات موجود در این ناحیه

در نمودار ۱۰، درصد نسبت ذرات ته‌نشین شده روی کف به کل ذرات اولیه در سه حالت زاویه هوای خروجی از دریچه چرخشی برای سه

در نمودار ۸، درصد ذرات خارج شده نسبت به کل ذرات اولیه در اتاق پس از گذشت مدت زمان ۴۰۰ ثانیه برای ذرات با قطرهای ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر برای سه زاویه ورود هوای دریچه چرخشی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نشان داده شده است. افزایش زاویه خروج هوا از دریچه چرخشی باعث تغییر الگوی جریان داخل شده و موجب خروج ذرات بیشتری می‌شود؛ به طوری که با افزایش زاویه خروجی از ۳۰ به ۴۵ و از ۴۵ به ۶۰ درجه به ترتیب درصد ذرات خارج شده، افزایش می‌یابد. در زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه، درصد ذرات خارج شده با قطر ۲/۵ میکرومتر به ترتیب برابر ۳۲ و ۵۵٪ کل ذرات می‌باشند. درصد ذرات خارج شده نشان می‌دهد که زاویه هوای خروجی از دریچه چرخشی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خروج ذرات و در نتیجه کیفیت هوای داخل دارد، به طوری که با افزایش اندازه ذرات، درصد ذرات خارج شده کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش اندازه ذرات، زمان واکنش و نیروی جاذبه وارد بر ذرات افزایش یافته و باعث می‌شود که ذرات همراهی کمتری با جریان داشته و در نتیجه درصد کمتری از ذرات از اتاق خارج شوند.

تأثیر مخرب آلاینده‌های ذره‌ای بر سلامتی و احتمال ورود ذرات موجود در ناحیه تنفسی (۰/۹ تا ۱/۱ متری) به بدن انسان باعث شده است که در این تحقیق، غلظت ذرات موجود در این ناحیه مورد بررسی قرار گیرند. در نمودار ۹ منحنی نسبت تعداد ذرات موجود به تعداد ذرات اولیه در ناحیه تنفسی افراد نشسته برای ذرات با قطرهای ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر در طول زمان ترسیم شده است. مطابق نمودار، برای ذرات با هر اندازه، تغییرات زاویه هوای خروجی از دریچه چرخشی نشان می‌دهد که در حالت ۶۰ درجه، درصد ذرات موجود در ناحیه تنفسی نسبت به حالت ۳۰ و ۴۵ درجه کمتر است، بنابراین در این حالت درصد ذرات در ناحیه تنفسی سریع‌تر کاهش می‌یابد. نمودار ۹ به خوبی نشان می‌دهد که حالات ۳۰ و ۴۵ درجه نسبت به حالت ۶۰ درجه باعث پراکندگی بیشتر ذرات شده و ذرات موجود در ناحیه تنفسی برای این دو حالت مدت زمان طولانی‌تری در ناحیه تنفسی وجود دارند. همچنین بررسی تأثیر اندازه ذرات نشان می‌دهد که با افزایش قطر ذرات، درصد ذرات موجود در ناحیه تنفسی سریع‌تر کاهش می‌یابد. نوسانات مشاهده شده در نمودار ۹ که در نتیجه شمارش تعداد ذرات موجود در ناحیه تنفسی توسط دیدگاه لاگرانژی است، ناشی از حرکت تصادفی ذرات همراه با جریان هوای داخل اتاق است.

**نمودار ۸** درصد ذرات خارج شده نسبت به کل ذرات اولیه داخل اتاق

کاهش داد. بررسی تأثیر زاویه هوای ورودی از دریچه چرخشی نشان می‌دهد که با افزایش زاویه خروجی از ۳۰ به ۴۵ و از ۴۵ به ۶۰ درجه، درصد ذرات خارج شده افزایش می‌یابد. به طوری که در حالت زاویه ۳۰ و ۶۰ درجه، درصد ذرات خارج شده با قطر ۲/۵ میکرومتر به ترتیب برابر ۳۲ و ۵۵٪ کل ذرات می‌باشند. با توجه به اینکه در حالت ۶۰ درجه، درصد ذرات خارج شده از خروجی نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است، در نتیجه در این حالت درصد ذرات در ناحیه تنفسی سریع‌تر کاهش می‌یابد. بنابراین مناسب‌ترین حالت زاویه هوای خروجی از دیدگاه دفع آلاینده‌های ذره‌ای زاویه ۶۰ درجه است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

فهرست علائم

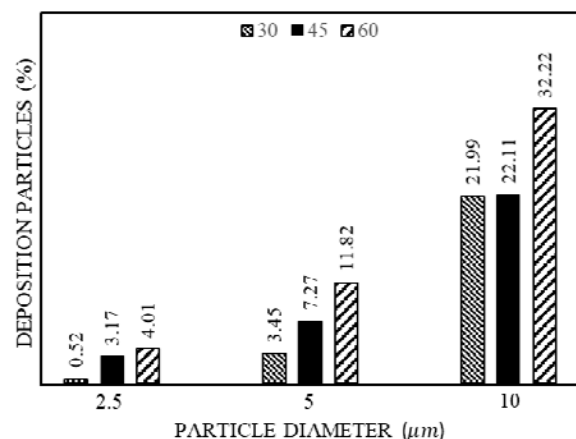
A_D	سطح تماس بدن (m^2)
C_C	ضریب تصحیح کانینگهام
C_i	تعداد ذرات اولیه موجود در ناحیه تنفسی
C_p	تعداد ذرات در ناحیه تنفسی در هر لحظه از زمان
$CSIG$	سیگنال سرد
F_B	نیروی شناوری
F_D	نیروی درگ
F_G	نیروی ناشی از گرانش
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
M	نرخ متابولیک (Wm^{-2})
Q	تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح (Wm^{-2})
S	پارامتر مربوط به جمله چشمه
$\vec{S}$	نیروهای حجمی ($kgm^{-2}s^{-2}$)
T	دما (K)
TSENS	شاخص آسایش حرارتی (بی‌بعد)
V	سرعت (ms^{-1})
W	کار خارجی ماهیچه‌ها (Wm^{-2})
علائم یونانی	
α	ضریب نفوذ (kgm^{-3})
β	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
λ	فاصله پویش آزاد (m)

منابع

- 1- Rahimi-Gorji M, Pourmehran O, Gorji-Bandpy M, Gorji TB. 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*. 2015;209:121-133.
- 2- Owen MS, editor. *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2009.
- 3- Wang X, Zhang Y, Funk TL, Zhao L, Riskowski GL. Effect of ventilation system on particle spatial distribution in ventilated rooms. *ASHRAE Transactions*. 2004;110(2): 258-266.
- 4- Yocom JE. A critical review. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1982;32(5):500-520.
- 5- Wallace L. Indoor particles: a review. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1996;46(2):98-126.

اندازه ذره ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر نشان داده شده است. مطابق نمودار ۱۰، درصد ذرات ته‌نشین شده روی کف برای ذرات ۲/۵ میکرومتری کم بوده و با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. این اختلاف در ته‌نشینی ذرات مختلف به دلیل اختلاف در نیروی جاذبه آنها است. این نمودار همچنین نشان می‌دهد که برای ذرات با اندازه‌های ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر بیشترین میزان ذرات ته‌نشین شده مربوط به حالت هوای خروجی ۶۰ درجه است، زیرا، در این الگوی جریان، ذرات موجود در اتاق پس از برخورد جریان هوا به سقف همراه با جریان به سمت کف حرکت کرده و ذرات بیشتری روی کف ته‌نشین می‌شوند. در حالت‌های ۳۰ و ۴۵ درجه، توزیع لایه‌ای دما در راستای ارتفاع و چگالی بیشتر لایه‌های هوای نزدیک کف، باعث جلوگیری از حرکت ذرات به سمت کف می‌شود.

در جدول ۲، درصد مجموع ذرات خارج شده و ته‌نشین شده روی کف پس از گذشت ۴۰۰ ثانیه برای سه حالت زاویه هوای ورودی از دریچه چرخشی برای سه اندازه ذره ۲/۵، ۵ و ۱۰ میکرومتر نشان داده شده است. تأثیر زاویه هوای خروجی نشان می‌دهد که برای ذرات با هر اندازه‌ای، زاویه خروج هوا در حالت ۶۰ درجه نسبت به دو حالت ۳۰ و ۴۵ درجه باعث می‌شود، درصد بیشتری از ذرات اولیه داخل اتاق خارج شده یا روی کف ته‌نشین شوند. بنابراین مناسب‌ترین حالت زاویه هوای خروجی از دیدگاه خروج آلاینده‌های ذره‌ای زاویه ۶۰ درجه است.



نمودار ۱۰) درصد ذرات ته‌نشین شده روی کف نسبت به کل ذرات اولیه داخل اتاق

جدول ۲) درصد ذرات خارج شده و ته‌نشین شده روی کف پس از گذشت ۴۰۰ ثانیه

قطر ذره (میکرومتر)	۱۰	۵	۲/۵
زاویه هوای ورودی ۳۰ درجه	۳۹	۳۳	۲۲
زاویه هوای ورودی ۴۵ درجه	۵۶	۴۴	۴۲
زاویه هوای ورودی ۶۰ درجه	۷۲	۶۱	۵۹

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر زاویه ورودی هوا (سه حالت مورد بررسی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) از یک دریچه چرخشی در سیستم توزیع هوای زیرسطحی بر شرایط آسایش حرارتی و توزیع ذرات در یک اتاق بررسی شده است. برای حل جریان و توزیع ذرات از دیدگاه اویلری- لاگرانژی و توسعه حل‌گرهای این‌فوم و برای ارزیابی احساس حرارتی افراد از مدل دونقطه‌ای گایج استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در هر سه زاویه فوق‌الذکر، شاخص TSENS در ناحیه آسایشی قرار دارند. با این حال، با تغییر زاویه چرخش از ۳۰ به ۶۰، نارضایتی موضعی ناشی از اختلاف عمودی دما را می‌توان به اندازه ۱ درجه سلسیوس

15- Zhang K, Zhang X, Li S. Simplified model for desired airflow rate in underfloor air distribution (UFAD) systems. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:244-250.

16- Liu S, Clark J, Novoselac A. Air diffusion performance index (ADPI) of overhead-air-distribution at low cooling loads. *Energy and Buildings*. 2017;134:271-284.

17- Yau YH, Poh KS, Badarudin A. A numerical airflow pattern study of a floor swirl diffuser for UFAD system. *Energy and Buildings*. 2018;158:525-535.

18- Zhao B, Zhang Z, Li X, Huang D. Comparison of diffusion characteristics of aerosol particles in different ventilated rooms by numerical method. *ASHRAE Transactions*. 2004;110(1):88-95.

19- Zhao B, Zhang Y, Li X. Numerical analysis of the movement of biological particles in two adjacent rooms. *ASHRAE Transactions*. 2004;110(2).

20- Fanger PO. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. New York: McGraw Hill; 1970.

21- Gagge AP, StolwijkAJ, Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*. 1971;77:247-262.

22- Fessler JR, Eaton JK. Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1999;394:97-117.

23- BS EN. ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *Ergonomics of the physical environment*. 2005.

24- ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy. *ASHRAE Journal* [Internet]. 2013 [Unknown cited]. Available from: <https://bit.ly/2UeAoRB>.

6- Monn C. Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone. *Atmospheric Environment*. 2001;35(1):1-32.

7- U. S. EPA. Why Is the Environment Indoors Important to Us? Indoor Environment Division [Internet]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency; 2000 [Unknown cited]. Available from: Not Found

8- Zhao B, Zhang Y, Li X, Yang X, Huang D. Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method. *Building and Environment*. 2004;39(1):1-8.

9- Kobayashi N, Chen Q. Floor-supply displacement ventilation in a small office. *Indoor and Built Environment*. 2003;12(4):281-291.

10- Lau J, Chen Q. Floor-supply displacement ventilation for workshops. *Building and Environment*. 2007;42(4):1718-1730.

11- Sajadi B, Saidi MH, Mohebbian A. Numerical investigation of the swirling air diffuser: Parametric study and optimization. *Energy and Buildings*. 2011;43(6):1329-1333.

12- Yao T, Lin Z. An experimental and numerical study on the effect of air terminal types on the performance of stratum ventilation. *Building and Environment*. 2014;82:431-441.

13- Fathollahzadeh MH, Heidarinejad G, Pasharshahri H. Prediction of thermal comfort, IAQ, and energy consumption in a dense occupancy environment with the under floor air distribution system. *Building and Environment*. 2015;90:96-104.

14- Heidarinejad G, Fathollahzadeh MH, Pasharshahri H. Effects of return air vent height on energy consumption, thermal comfort conditions and indoor air quality in an under floor air distribution system. *Energy and Buildings*.