



## ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر جهت و ارتفاع ورودی بر الگوی جریان و شرایط آسایش حرارتی تحت سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار

سید علیرضا ذوالفقاری<sup>۱\*</sup>، مصطفی ایزدی<sup>۲</sup>، شایان حجتیان<sup>۳</sup>، صادق یوسفی<sup>۳</sup>، مهدی سورگی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

### چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا الگوی توزیع سرعت، دما و شاخص احساس حرارتی در اتاقی دارای سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار به ازای دو ارتفاع ۳۰ و ۱۶۰ سانتی‌متری از کف برای قرارگیری دریچه ورودی و با دو دمای ورودی ۱۶°C و ۲۴°C و همچنین سه زاویه مختلف وزش جت (صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ درجه) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که موارد فوق به طور چشمگیری به جانمایی دریچه ورودی وابسته است. به طوری که با قرارگیری دریچه در ارتفاع ۱۶۰ سانتی‌متری، نیم‌تنه بالایی فرد به شدت تحت تأثیر دریچه قرار می‌گیرد و بیشینه سرعت در این ناحیه، بسته به تغییر زاویه وزش از صفر تا ۴۵ درجه، می‌تواند به ترتیب به ۱/۵ تا ۱ متر بر ثانیه برسد و همین امر باعث می‌شود که ناراضی ناشی از کوران در نیم‌تنه بالایی به طور چشمگیری افزایش یابد. این در حالی است که با قرارگیری دریچه در زیر میز و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری، بیشترین ناراضی ناشی از کوران در بخش پا و ساق افراد رخ می‌دهد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که ناراضی ناشی از کوران، مهمترین عاملی است که می‌تواند استفاده از سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار را محدود نماید.

**کلمات کلیدی:** سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار؛ آسایش حرارتی؛ ناراضی ناشی از کوران؛ تحقیق آزمایشگاهی.

## Experimental Investigation of Effect of Inlet Direction and Height on Flow Pattern and Thermal Comfort Conditions under Personalized Confluent Jets Ventilation System

S. A. Zolfaghari<sup>1\*</sup>, M. Izadi<sup>2</sup>, S. Hojatian<sup>3</sup>, S. Yoosefi<sup>3</sup>, M. Soorgi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, University of Birjand, Birjand.

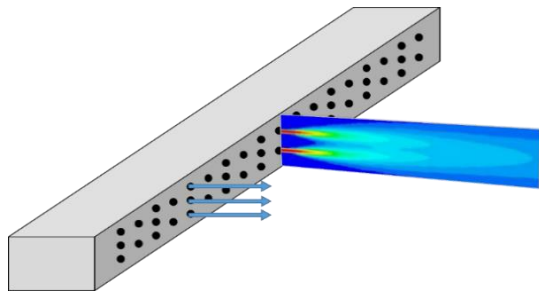
<sup>2</sup>M.Sc. Student, University of Birjand, Birjand.

<sup>3</sup>B.Sc. Student, University of Birjand, Birjand.

### Abstract

In this study, the flow pattern, temperature distribution and thermal comfort index have been experimentally investigated in a room with personalized confluent jets ventilation (CJV) system for different diffusers' heights of 30 and 160cm from the floor and for two inlet temperatures of 16 and 24°C and three different inlet angles of 0, 22.5 and 45 degrees. The results showed that the above cases can be significantly affected by changing in location of inlet diffuser. So that by placing the inlet diffuser at a height of 160 cm, the occupants' upper body is strongly affected by the flow and the maximum air velocity in this region, depending on the change of inlet flow angle from zero to 45 degrees, can respectively reach about 1.5 to 1 m/s and this causes the draught dissatisfaction in the occupants' upper body. However, by placing the diffuser under the desk and at a height of 30cm, the most dissatisfaction caused by draught occurs in the legs and feet. Finally, it can be concluded that the draught dissatisfaction is the most important factor that can limit the use of personalized confluent jets ventilation system.

**Keywords:** Personalized Confluent Jets Ventilation System; Thermal Comfort; Dissatisfaction of Draught; Experimental Investigation.



شکل ۱- نمایشی از سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار

جابه‌جایی دارد و عمر متوسط هوا برای این سیستم، در محدوده مناسب قرار می‌گیرد.

چو و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۸ به صورت آزمایشگاهی و عددی، عملکرد سیستم تهویه جت‌های هم‌شار را با سیستم تهویه جابه‌جایی مقایسه نمودند و رابطه‌ای تجربی برای تخمین سرعت بیشینه در خط مرکزی جریان با استفاده از مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده استخراج کردند. جانبخش و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴، عملکرد سیستم تهویه جت‌های هم‌شار را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند؛ همچنین در تحقیقی دیگر، جانبخش و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۴ سیستم تهویه جت‌های هم‌شار را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان حاکی از آن بود که الگوی جریان ناشی از این سیستم، تقریباً مستقل از نرخ جریان است. ارغند و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۵ پارامترهای آسایشی را برای سیستم تهویه جت‌های هم‌شار، اختلاطی و سیستم زیر سطحی در یک فضای اداری پلان-باز مطالعه کردند. نتایج ایشان نشان داد که رفتار سیستم تهویه جت‌های هم‌شار و سیستم زیر سطحی، تا حد زیادی مانند سیستم اختلاطی است؛ همچنین، ایشان نشان دادند که شاخص‌های استاندارد آسایشی برای درجه‌های جت‌های هم‌شار که در گوشه‌های اتاق نصب شده باشند، در محدوده استاندارد قرار دارد. سونسون و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۵ به بررسی عددی عوامل موثر بر نازل‌های دایروی درجه جت‌های هم‌شار پرداختند. نتایج تحقیق ایشان حاکی از آن است که عدد بی‌بعد نسبت فاصله مرکزی نازل‌ها بر قطر آن‌ها، پارامتر مهمی در طراحی جت‌های هم‌شار است و این پارامتر بر نقطه همگرایی جت‌ها و شدت اغتشاشات جریان تأثیرگذار است. اندرسون و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به صورت آزمایشگاهی و عددی از یک درجه جت‌های هم‌شار

## ۱- مقدمه

طبق استاندارد اشری [۱]، تأمین تهویه کافی و مناسب برای محیط‌های داخلی و اشغال شده توسط انسان‌ها، با هدف دستیابی به آسایش حرارتی افراد و حفظ سلامتی ایشان الزامی است. بر این اساس، سال‌هاست که طراحی سیستم‌های تهویه کارآمد و منطبق با نیازهای افراد مورد توجه طراحان و مهندسان قرار گرفته است [۲ و ۳]. در این میان، سیستم‌های تهویه انفرادی به دلیل اینکه مستقیماً ناحیه حضور افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهند، کارایی نسبتاً بالایی دارند [۴ و ۵] و نسبت به سایر سیستم‌ها، دارای مزایای قابل توجهی از جمله امکان کنترل سرعت، جهت وزش جریان و کنترل دمای درجه توسط افراد هستند. از سوی دیگر، سیستم تهویه جت‌های هم‌شار<sup>۱</sup> اخیراً به عنوان یکی از سیستم‌های تهویه انفرادی مورد توجه قرار گرفته است. جت‌های هم‌شار (شکل ۱)، به جت‌هایی اطلاق می‌شود که از روزنه‌هایی با فاصله نسبتاً (جانمایی شده روی یک صفحه یا یک استوانه) در جهت‌های تقریباً موازی خارج می‌شوند و در پایین دست به یکدیگر می‌رسند و به عنوان یک جت واحد به حرکت خود ادامه می‌دهند [۶].

در سال‌های اخیر، تحقیقات قابل توجهی در خصوص عملکرد سیستم جت‌های هم‌شار صورت پذیرفته است. آویی [۶] در سال ۲۰۰۳ به بررسی سرعت سیستم جت‌های هم‌شار و عوامل موثر بر آن پرداخت. او نشان داد که در حالتی که جت‌ها به یکدیگر نزدیک باشند، سرعت بیشینه در نزدیکی دهانه خروجی افزایش می‌یابد. چو و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ معادلات جریان جت‌های هم‌شار را استخراج کردند و جریان را در جت‌های هم‌شار به سه ناحیه آزاد، کواندا و دیواری تقسیم کردند؛ همچنین، ایشان [۸] در سال ۲۰۰۵ سرعت انتشار جریان افقی را بین سیستم جت‌های هم‌شار و سیستم تهویه جابه‌جایی با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که سیستم تهویه جت‌های هم‌شار، سرعت انتشار بالاتری نسبت به سیستم تهویه جابه‌جایی دارد. نتایج تحقیق آزمایشگاهی کریمی پناه و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۵ نشان داد که سیستم تهویه جت‌های هم‌شار کارایی بیشتری نسبت به سیستم تهویه

<sup>۱</sup> Confluent Jets Ventilation Systems

در سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار به دلیل ماهیت انفرادی بودن آن و نزدیک بودن دریاچه تخلیه به محل حضور افراد، لازم است تا تأثیر این سیستم بر شرایط آسایش حرارتی کلی و موضعی به ویژه رخداد کوران<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور، در تحقیق حاضر الگوی توزیع دما و سرعت در محل حضور افراد به صورت آزمایشگاهی تعیین شده است و علاوه بر آن، شاخص آسایش حرارتی میانگین رأی افراد و نیز شاخص درصد ناراضی ناشی از کوران برآورد شده است. سیستم‌های تهویه انفرادی می‌توانند با جانمایی‌های مختلف نصب شوند که در این تحقیق، عملکرد دو مدل بالاسری و زیرمیزی با هم مقایسه شده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر تأثیر سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار بر الگوی دما و جریان و شرایط آسایش، به ازای دو دمای ورودی ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس، در سه زاویه مختلف دریاچه و در دو ارتفاع از کف، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

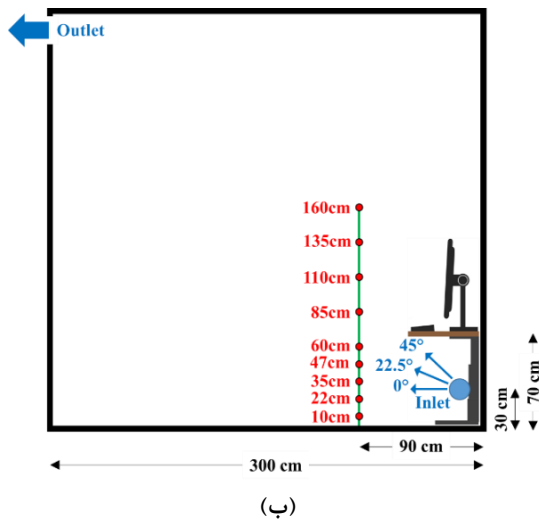
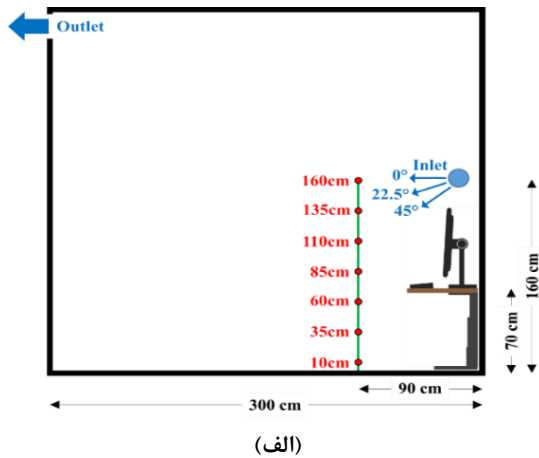
## ۲- ابزار و روش آزمایشگاهی

مطالعه بر روی سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار در گروه پژوهشی انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی دانشگاه بیرجند در اتاقک آزمایشگاهی مطابق شکل ۲ انجام شده است. این اتاقک به طول ۳ متر، عرض ۳ متر و ارتفاع ۲/۷ متر در محیط بزرگتری قرار دارد که تابش مستقیم نور خورشید و شرایط دمایی هوای بیرون بر شرایط حرارتی اتاقک تأثیری ندارند. در اتاقک یک عدد میز اداری و رایانه به همراه ۵ عدد لامپ کم مصرف ۳۶ وات جهت روشنایی روی سقف تعبیه شده است. مطابق شکل ۲ (ب)، دریاچه جت‌های هم‌شار مورد استفاده دارای ۶ ردیف نازل دایروی (۱۰۱ نازل در هر ردیف) است و هر یک از نازل‌ها دارای قطر ۴ میلی‌متر است و با فاصله قطری ۵ میلی‌متر از یکدیگر، روی یک کانال استوانه‌ای به قطر ۶ سانتیمتر جانمایی شده است. در این آزمایش سعی شده است تا تأثیر قرارگیری جت‌های هم‌شار در دو ارتفاع مختلف (۳۰ و ۱۶۰ سانتی‌متر از کف) به ازای سه زاویه مختلف (صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ درجه) برای وزش مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۳ (الف)، شماتیک اتاقک آزمایشگاهی

جدید به همراه تیغه در روزه‌ها استفاده کردند که باعث توزیع مساوی هوا، در بین نازل‌ها گردید. نتایج نشان داد که در این مدل خاص، توزیع جریان در بین ردیف‌های افقی تقریباً یکسان بوده و در ستون‌های عمودی در جهت رو به پایین افزایش داشته است. ذوالفقاری و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۲۰ به بررسی سیستم انفرادی جت‌های هم‌شار در دو حالت ۴ ردیفه و ۶ ردیفه پرداختند که نتایج نشان داد، حالت ۶ ردیفه شرایط آسایشی مناسب‌تری نسبت به حالت ۴ ردیفه ایجاد می‌کند. اندرسون [۱۶] در سال ۲۰۲۰ به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر تکانه بر عملکرد جت‌های هم‌شار پرداخت و نشان داد که کم شدن تکانه خطی در سیستم جت‌های هم‌شار، موجب افزایش کارایی آن می‌شود.

از سوی دیگر، از آنجایی که سیستم جت‌های هم‌شار مورد بررسی در تحقیق حاضر، به گونه‌ای طراحی شده است که مستقیماً محل نشستن افراد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا لازم است تا به طور مختصر، مروری بر تحقیقات انجام شده مرتبط با سیستم‌های تهویه انفرادی صورت پذیرد. کژمارک و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۲، عکس العمل افراد را نسبت به سیستم تهویه انفرادی بررسی کردند و نشان دادند که سیستم تهویه انفرادی باعث بهبود کیفیت هوای داخل می‌شود و هر چه دمای دریاچه نسبت به اتاقک پایین‌تر باشد، بهتر می‌تواند به بهبود کیفیت هوا کمک کند. همچنین ملیکوف و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۵، پنج مدل سیستم تهویه مختلف در اطراف افراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که به طور کلی این سیستم باعث بالا رفتن رضایت و افزایش کیفیت هوا می‌گردد. در سال ۲۰۰۷ نیو و همکاران [۱۹]، به صورت آزمایشگاهی سیستم تهویه انفرادی را در حالت نصب شده روی صندلی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند تا ۸۰ درصد سطح آلودگی هوای استنشاقی افزایش یافته و با افزایش نرخ جریان کیفیت هوا بیشتر شده است. بین یانگ و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۰ به بررسی سیستم تهویه انفرادی سقفی در مقایسه با سیستم تهویه اختلاطی پرداختند. نتایج ایشان حاکی از آن است که با استفاده از سیستم تهویه انفرادی در اتاقی با دمای بالا (۲۶ درجه سلسیوس)، نسبت به سیستم تهویه اختلاطی می‌توان مصرف انرژی کمتری را تجربه کرد.

<sup>۱</sup> Draught



شکل ۳- شماتیک سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار به همراه نقاط اندازه‌گیری و نحوه چرخش دریچه در اتاقک کنترلی، (الف) دریچه ورودی در ارتفاع ۱۶۰ سانتی‌متری از کف و (ب) دریچه ورودی در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری از کف

ثانیه و رطوبت را با رزولوشن ۰/۱ و دقت  $\pm 1/5\%$  اندازه‌گیری می‌کند.

در طول آزمایش دمای اتاقک در محدوده  $24 \pm 0.2$  ثابت نگه داشته شده است؛ همچنین، با وجود ۶۰۶ نازل روی دریچه جت‌های هم‌شار، سرعت هوای ورودی از هر یک از نازل‌ها حدود ۵ متر بر ثانیه است؛ همچنین، پس از اندازه‌گیری دما و سرعت و استفاده از مدل آسایشی فن‌گر [۲۱] و روابط مربوط به ناراضی ناشی از کوران، تأثیر سیستم مذکور بر شرایط جریان و دمای اتاق و شرایط آسایش افراد مورد تحلیل قرار گرفته است.

با قرار گرفتن دریچه در ارتفاع ۱۶۰ سانتی‌متری از کف را به همراه نقاط اندازه‌گیری در محل نشستن افراد در مقابل میز اداری و نحوه تغییر زاویه دریچه (رو به پایین) را نشان می‌دهد. در این حالت نقاط اندازه‌گیری طبق شکل در فاصله ۹۰ سانتی‌متری از دیوار و در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۵، ۶۰، ۸۵، ۱۱۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ سانتی‌متری از کف بوده است.

در انجام این پژوهش هوای ورودی به سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار از طریق سیستم تبرید تراکمی کانال<sup>۱</sup> فراهم می‌شود و دمای هوای ورودی با حد مجاز  $\pm 0.2$  درجه سلسیوس کنترل می‌شود. شرایط سرعت، دما و رطوبت در اتاقک آزمایش به وسیله دستگاه TESTO-480 اندازه‌گیری می‌شود که این دستگاه مقادیر دما را با دقت ۰/۱ و دقت  $\pm 0.2$  درجه سلسیوس، سرعت را با دقت ۰/۰۱ متر بر



شکل ۲- نمایی از اتاقک و دریچه مورد استفاده (الف) اتاقک آزمایشگاهی و (ب) دریچه جت‌های هم‌شار مورد استفاده

<sup>۱</sup> Duct Split

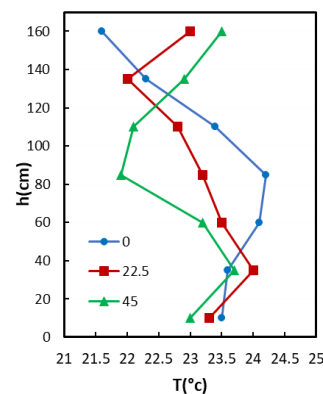
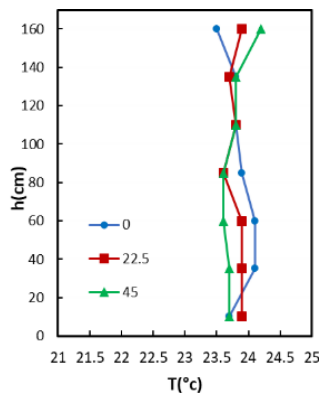
## ۳- نتایج و بحث

هم‌شار است. همانطور که در شکل ۴ (الف) ملاحظه می‌شود، با تخلیه هوای سرد ۱۶ درجه سلسیوس از دریچه مستقر در ۱۶۰ سانتی متری از کف با زاویه صفر درجه، به طور مستقیم ناحیه روبه‌روی جت تحت تأثیر قرار گرفته است و کمترین مقدار دما در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری ثبت شده است.

در این تحقیق الگوی توزیع دمای سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار در محل نشستن افراد، به ازای دو ارتفاع جانمایی دریچه، دو دمای ورودی و سه زاویه وزش مختلف بررسی شده است. شکل ۴ بیانگر الگوی توزیع دما در محل استقرار فرد تحت سیستم تهویه انفرادی جت‌های

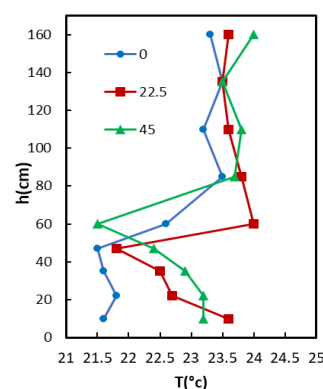
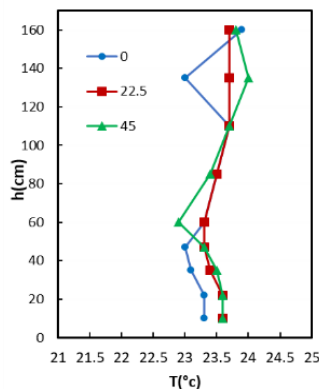
جدول ۱- متوسط دمای دیواره‌های اتاق کنترلی

دیواره‌ها (°C)	پنجره‌ها (°C)	سقف (°C)	کف (°C)	درب (°C)	دمای ورودی دریچه
۲۳/۳ ± ۰/۴	۲۳/۳ ± ۰/۳	۲۳ ± ۰/۲	۲۳/۱ ± ۰/۳	۲۳/۵ ± ۰/۲	۱۶ درجه سلسیوس
۲۳/۹ ± ۰/۳	۲۳/۹ ± ۰/۲	۲۳/۶ ± ۰/۲	۲۳/۴ ± ۰/۳	۲۴/۳ ± ۰/۲	۲۴ درجه سلسیوس



(ب) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر

(الف) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر



(د) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر

(ج) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر

شکل ۴- الگوی توزیع دما در محل نشستن افراد تحت سیستم جت‌های هم‌شار مستقر در ارتفاع‌های ۱۶۰ و ۳۰ سانتی متری از کف با زوایای ورودی مختلف

به بیان دیگر، تغییر ارتفاع دریچه ورودی، تأثیر چندانی بر بازه تغییرات دما در محل حضور افراد ندارد. در حالی که این تغییر ارتفاع ورودی، الگوی توزیع دما را در محل حضور افراد به طور کلی دگرگون کرده است. نهایتاً با افزایش دمای ورودی به ۲۴ درجه سلسیوس در ارتفاع تخلیه ۳۰ سانتی متری از کف، همانطور که در شکل ۴ (د) نشان داده شده است، همانطور که انتظار می‌رفت، بازه تغییرات دما نسبتاً محدود و در نزدیکی دمای متوسط اتاق (۲۴ درجه سلسیوس) است.

شکل ۵ پروفیل سرعت متوسط در محل استقرار فرد تحت سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد.

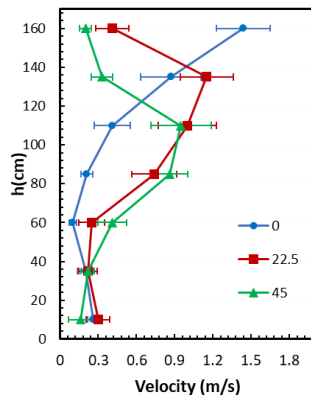
در شکل‌های ۵ (الف) و ۵ (ب) الگوی سرعت متوسط القا شده ناشی از وزش هوا از دریچه جانمایی شده در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری از کف به ازای دو دمای مختلف ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس ارائه شده است. با مقایسه شکل‌های مذکور می‌توان چنین نتیجه گرفت که دمای هوای وزشی از دریچه، تأثیر قابل توجهی بر توزیع سرعت در ناحیه حضور افراد ندارد و طبق انتظار الگوی سرعت، صرفاً تحت تأثیر جانمایی دریچه و نیز زاویه پرتاب جت است. طبق شکل ۵ (الف) و ۵ (ب)، برای حالت وزش افقی از دریچه مستقر در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری، بیشینه سرعت در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری و مقدار آن حدود ۱/۵ متر بر ثانیه ثبت شده است. این در حالی است که با تغییر زاویه ورودی به ۲۲/۵ درجه، مقدار سرعت بیشینه به حدود ۱/۲ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد و نیز ارتفاعی که در آن سرعت به بیشینه مقدار می‌رسد، نسبت به قبل کمتر می‌شود. دلیل این امر، دور شدن فاصله محل تخلیه جت از خط حضور افراد به دلیل تغییر زاویه جریان وزشی است؛ همچنین، با تغییر زاویه ورودی به ۴۵ درجه، همانطور که پیش‌بینی می‌شد، بیشینه سرعت به حدود ۱ متر بر ثانیه می‌رسد. ضمن اینکه در این حالت، مقدار بیشینه سرعت در ارتفاع ۱۱۰ سانتی متری از کف ثبت شده است.

شکل‌های ۵ (ج) و ۵ (د)، توزیع سرعت القا شده در خط استقرار افراد را به ازای دریچه جانمایی شده در ارتفاع ۳۰ سانتیمتری از کف و به ازای دمای ورودی ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی توزیع سرعت در دو حالت دما نسبتاً یکسان است و

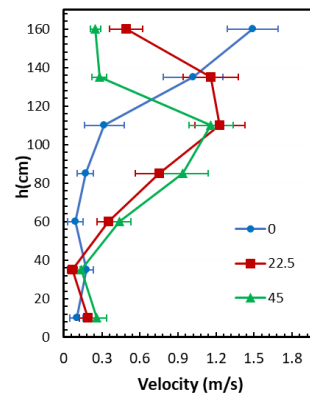
این در حالی است که با افزایش زاویه به ۲۲/۵ درجه و ۴۵ درجه، کمینه دما به ترتیب در ارتفاع‌های ۱۳۵ و ۸۵ سانتی متری از کف ثبت شده است؛ همچنین، مقدار کمینه دما در محل نشستن افراد در بازه ۲۱ تا ۲۲ درجه سلسیوس قرار دارد. این امر نشان می‌دهد که در سیستم تهویه جت‌های هم‌شار، دمای هوای خروجی از دریچه به سرعت به دمای متوسط اتاق نزدیک می‌شود و همانطور که ملاحظه شد، هوا با دمای ۱۶ درجه سلسیوس پس از خروج از دریچه و پس از اختلاط جت با هوای اتاق، سریعاً به دمای متوسط اتاق (۲۴ درجه سلسیوس) میل کرده است. به طوری که محدوده تغییرات دما در سه نمودار شکل ۴ (الف)، در بازه حدود ۲۱/۵ تا ۲۴/۲ قرار دارد.

این در حالی است که مطابق شکل ۴ (ب)، تخلیه هوای ۲۴ درجه سلسیوس از دریچه مستقر در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری در اتاقی با دمای متوسط ۲۴ درجه سلسیوس (جت و اتاق هم‌دما)، تأثیر قابل توجهی بر تغییر الگوی دما در محل استقرار افراد ندارد و همانطور که پیش‌بینی می‌شد، تغییر زاویه وزش نیز بر الگوی دما در محل استقرار افراد تقریباً تأثیرگذار نیست. در این حالت، دما در محدوده حضور افراد در بازه بین ۲۳/۵ تا ۲۴/۵ قرار می‌گیرد. در شکل ۴ (ج) تأثیر تخلیه هوا با دمای ۱۶ درجه سلسیوس از دریچه مستقر در ۳۰ سانتی متری از کف، بر الگوی دما در ناحیه استقرار فرد نشان داده شده است. در شرایط وزش افقی، دما از ارتفاع ۱۰ تا حدود ۴۷ سانتی متری تقریباً ثابت و در محدوده ۲۱/۵ تا ۲۲ درجه سلسیوس قرار دارد، این در حالی است که در ارتفاع‌های بالاتر، سریعاً دما افزایش پیدا می‌کند و به مقدار متوسط ۲۴ درجه سلسیوس نزدیک می‌شود.

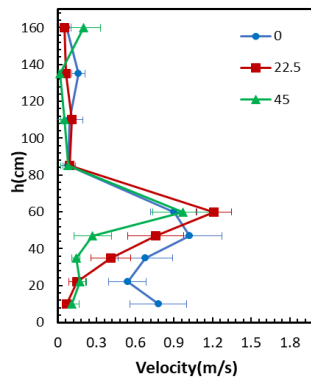
با افزایش زاویه وزش از صفر به ۲۲/۵ درجه سلسیوس، کمینه دما باز هم در حدود ۴۷ سانتی متری از کف ثبت شده است؛ با این تفاوت که نواحی نزدیک کف (ارتفاع کمتر از ۲۰ سانتی متری) تأثیر بسیار کمتری از دمای جت پذیرفته است. همچنین، با تغییر زاویه وزش به ۴۵ درجه، محل وقوع کمینه دما به ارتفاعی بالاتر (۶۰ سانتی متری از کف) منتقل شده است. ضمناً نکته قابل توجهی که می‌توان از مقایسه بین شکل‌های ۴ (الف) و ۴ (ج) استنباط کرد، این است که محدوده تغییرات دما در هر دوی این حالات تقریباً با هم یکسان است.



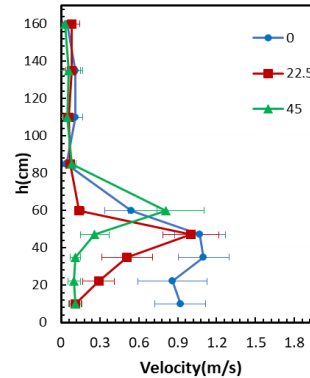
(ب) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر



(الف) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر



(د) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر



(ج) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر

شکل ۵- الگوی توزیع سرعت متوسط در محل نشستن افراد تحت سیستم جت‌های هم‌شار مستقر در ارتفاع‌های ۱۶۰ و ۳۰ سانتی متری از کف با زوایای ورودی مختلف

مقاومت حرارتی  $0.16 \text{ clo}$  و فعالیت اداری در نظر گرفته شده است؛ همچنین، طبق استاندارد اشری [۲۱] شاخص میانگین رأی افراد (PMV) که بیانگر احساس حرارتی متوسط افراد است، از ۳- تا ۳+ درجه‌بندی می‌شود که بیانگر احساس افراد از سرد تا داغ است. لازم به ذکر است، برای برقراری شرایط آسایشی در افراد، بایستی شاخص PMV طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰ [۲۰] بین  $0.5$  و  $-0.5$  باشد. با توجه به ارتفاع صندلی آزمایشگاه و میز اداری، در حالت نشسته پایین تنه افراد با توجه به نقاط اندازه‌گیری در محدوده ۱۰ تا حدود ۶۰ سانتی متری از کف و بالا تنه آن‌ها از ۶۰ تا ۱۳۰ سانتی متری از کف است و به طور معمول، سر افراد در حالت نشسته در ارتفاع بین ۱۱۰ تا ۱۳۰ سانتی‌متری از کف قرار می‌گیرد.

سرعت القا شده صرفاً از کف تا ارتفاع ۶۰ سانتی متری را تحت تأثیر قرار داده است و در ارتفاع‌های بالاتر، اثرات وزشی جت بسیار ناچیز است؛ همچنین، با افزایش زاویه جت به سمت بالا، طبق انتظار، بیشینه سرعت به ارتفاع بالاتری منتقل می‌شود.

عوامل مختلفی از جمله، عوامل فردی مانند نرخ متابولیک افراد و پوشش همچنین عوامل محیطی مانند سرعت هوا، رطوبت و دما بر آسایش حرارتی افراد تأثیر گذار است. در این تحقیق برای پیش‌بینی احساس حرارتی افراد، از مدل استاندارد فنگر [۲۰] استفاده شده است. در این مدل، فرد دارای پوشش اداری (شامل شلوار، پیراهن آستین بلند، جوراب نخی، لباس زیر مردانه، و زیرپوش آستین بلند) با

جدول ۲- مشخصه PMV برای دما، زوایا و ارتفاع‌های مختلف ورودی سیستم انفرادی جت‌های هم‌شار

H <sub>cr</sub> (cm)	PMV <sub>cr</sub>	$\overline{PMV}$	زاویه (درجه)	ارتفاع ورودی (cm)	دمای ورودی (°C)
۴۷	-۲/۲۹	-۱/۳۶	۰		
۴۷	-۲/۱۴	-۰/۷۹	۲۲/۵	۳۰	۱۶
۶۰	-۲/۱۲	-۰/۷۱	۴۵		
۴۷	-۱/۷۱	-۱/۰۳	۰		
۶۰	-۲/۱۴	-۰/۷۴	۲۲/۵	۳۰	۲۴
۶۰	-۲/۱۲	-۰/۶۵	۴۵		
۱۶۰	-۲/۴۵	-۰/۸۷	۰		
۱۳۵	-۲/۱۵	-۱/۲۴	۲۲/۵	۱۶۰	۱۶
۱۱۰	-۲/۱۲	-۱/۲۴	۴۵		
۱۳۵	-۱/۳۴	-۰/۱۸	۰		
۱۳۵	-۱/۵۲	-۱/۰۲	۲۲/۵	۱۶۰	۲۴
۱۱۰	-۱/۳۸	-۰/۹۱	۴۵		

از کوران افراد طبق استاندارد اشری ۵۵ [۲۱] تعیین و در شکل ۶ نمایش داده شده است.

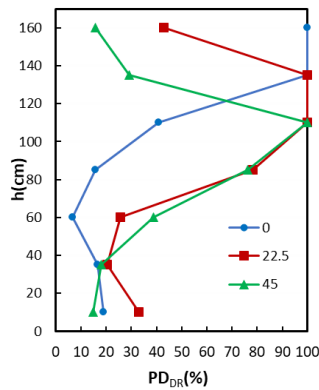
همانطور که در شکل‌های ۶ (الف) و ۶ (ب) مشاهده می‌شود، در حالت استقرار دریچه وزشی در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری از کف، وقوع نارضایتی ناشی از کوران در بخش بالاتنه افراد غیرقابل اجتناب است. به طوری که در بخش‌هایی از بالاتنه، میزان نارضایتی ناشی از کوران به ۱۰۰ درصد نیز می‌رسد که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب این سیستم به لحاظ شرایط رخداد کوران است. البته لازم به ذکر است که در این شرایط، دریچه با وزش افقی (زاویه صفر درجه) شرایط نسبتاً بهتری را به وجود آورده است. دلیل این امر نیز آن است که وزش افقی از دریچه باعث می‌شود که بدن افراد که در شرایط نشسته ارتفاعی تا حدود ۱۳۰ سانتی‌متر دارد، تحت تأثیر مستقیم وزش از دریچه قرار نگیرد و به همین دلیل میزان نارضایتی ناشی از کوران در این حالت نسبت به سایر زاویه‌ها مقداری کمتر است.

جدول ۲ شاخص میانگین رأی افراد با استفاده از مدل فن‌گر تحت سیستم انفرادی جت‌های هم‌شار در دو حالت استقرار دریچه در ارتفاع ۳۰ و ۱۶۰ سانتی متری از کف و به ازای دو دمای ورودی ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس در زوایا صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ درجه دریچه را نشان می‌دهد. از آنجایی که شاخص PMV اساساً یک شاخص آسایش حرارتی کلی محسوب می‌شود و برای ارزیابی احساس موضعی بخش‌های مختلف مناسب نیست، به همین منظور  $\overline{PMV}$  متوسط احساس حرارتی افراد را در طول محل نشستن آن‌ها در مقابل سیستم نشان می‌دهد؛ همچنین H<sub>cr</sub> و PMV<sub>cr</sub> به ترتیب ارتفاعی بیان می‌کند که شدیدترین احساس حرارتی را ثبت کرده‌اند. بر این اساس، شرایط برای جانمایی دریچه در ارتفاع ۳۰ سانتی متری از کف برای هردو دمای ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس احساس حرارتی به طور متوسط برای زاویه صفر درجه دریچه در محدوده خنک و سایر زوایا در محدوده کمی خنک قرار می‌گیرد. مقادیر احساس حرارتی بحرانی در ناحیه نزدیک به پای افراد اتفاق می‌افتد و بسته به دمای ورودی، شاخص PMV در این بخش‌ها حتی می‌تواند به احساس حرارتی خیلی کمی سرد نیز برسد.

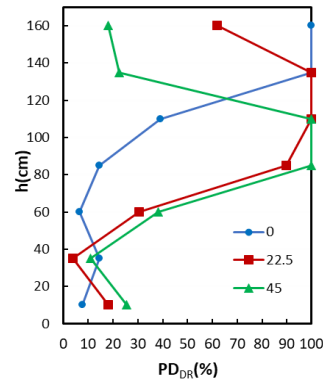
در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری دریچه از کف، احساس حرارتی متوسط برای هردو دما، با زاویه صفر درجه دریچه در محدوده کمی خنک و با افزایش زاویه حدوداً وارد محدوده خنک شده است؛ همچنین طبق انتظار ناحیه سر در شرایط نسبتاً نامناسب و بحرانی قرار می‌گیرد و هم در حالت دمای ورودی ۱۶ و هم دمای ورودی ۲۴ درجه سلسیوس، می‌تواند به دلیل القای سرعت نسبتاً زیاد موجب نارضایتی بشود.

به سرمایه‌های موضعی که بر اثر سرعت هوا، دما و اغتشاشات جریان وزشی رخ می‌دهد، کوران گفته می‌شود [۲۱] و طبق استاندارد ایزو ۷۷۳۰ درصد نارضایتی مجاز ناشی از کوران در ساختمان در محدوده کمتر از ۲۰٪ است [۲۲]. رخداد کوران، محتمل‌ترین پدیده نارضایتی حرارتی در محیط‌های دارای سیستم‌های وزشی است. از آنجایی که سیستم تهویه جت‌های هم‌شار در ناحیه نزدیک به افراد جانمایی شده است، لذا انتظار می‌رود که نارضایتی ناشی از کوران در افراد رخ دهد. بر این اساس، میزان نارضایتی ناشی

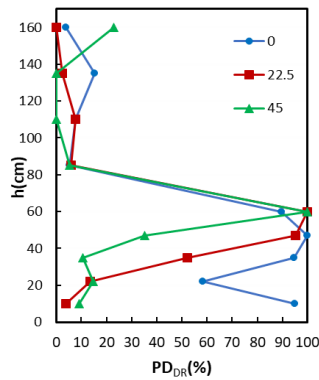




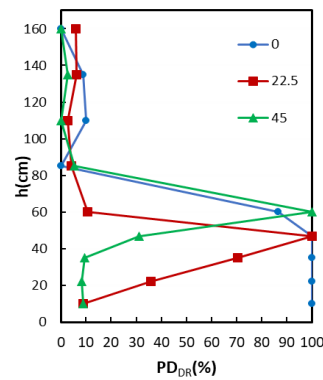
(ب) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر



(الف) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۱۶۰ سانتی متر



(د) دمای ۲۴ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر



(ج) دمای ۱۶ درجه سلسیوس با ارتفاع دریچه در ۳۰ سانتی متر

شکل ۶- درصد نارضایتی ناشی از کوران تحت سیستم جت‌های هم‌شار جانمایی شده در ارتفاع‌های ۳۰ و ۱۶۰ سانتی متری از کف با زوایای مختلف ورودی

بهترین عملکرد را از نظر کاهش سطح نارضایتی ناشی از کوران داشته است.

#### ۴- جمع بندی

در این پژوهش به بررسی عملکردی سیستم تهویه انفرادی جت‌های هم‌شار در یک اتاق اداری پرداخته شده است. این سیستم در سال‌های اخیر در صنعت تهویه در ساختمان، مورد توجه محققان قرار گرفته است و شناخت عملکرد آن از دید آسایش حرارتی افراد در ساختمان حائز اهمیت است. همچنین به دلیل ماهیت انفرادی بودن این سیستم و تعبیه دریچه در نزدیکی فرد، احتمال ایجاد نارضایتی موضعی ناشی از کوران بسیار بالا است. به همین منظور در این تحقیق به

ضمن اینکه با کاهش دمای دریچه ورودی، درصد نارضایتی ناشی از کوران اندکی افزایش می‌یابد. با این حال، نارضایتی ناشی از کوران بیشتر تحت تأثیر سرعت هوا تغییر کرده است؛ همچنین، در شکل‌های ۶ (ج) و ۶ (د) میزان نارضایتی ناشی از کوران تحت دریچه مستقر در ارتفاع ۳۰ سانتی متری از کف نشان داده شده است. در این حالت، به وضوح مشاهده می‌شود که نارضایتی ناشی از کوران در بالاتنه افراد رخ نمی‌دهد؛ بلکه صرفاً بخش پایین تنه و ناحیه پا و ساق افراد از نارضایتی شدید ناشی از کوران متأثر خواهد شد. ضمن اینکه در این حالت، برخلاف دو حالت قبلی بدترین عملکرد متعلق به دریچه با وزش افقی (زاویه صفر درجه) است و دریچه زیرمیزی با زاویه وزش ۴۵ درجه رو به بالا،

هر دو دما می‌توان در بیشتر نقاط بدن در حالت نشسته به جز ناحیه ۴۰ تا ۶۰ سانتی متری از کف ( ناحیه ساق و ران پا) ناراضیتی ناشی از کوران را در محدوده استاندارد و مجاز تأمین کرد.

#### ۵- مراجع

- [1] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 AN. Thermal environmental conditions for human occupancy.
- [۲] ذوالفقاری سع، حسن زاده ح، رئیسی م، طاهری م (۱۳۹۷) کاهش اثرات نامطلوب عدم تقارن تابشی برای مسافران اتوبوس از طریق عدم تقارن وزشی تحت شرایط تابستانه. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۴۶-۱۳۵: ۸(۱).
- [۳] ایمانی نژاد ز، ذوالفقاری سع، معرفت م، پاسدار شهری ه (۱۳۹۵) تأثیر جانمایی دریچه ورودی هوا بر کیفیت هوای داخل و آسایش حرارتی ساکنان در یک اتاق دارای سیستم گرمایش قرنیزی. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۷۰-۲۶۱: ۶(۳).
- [4] Karimipناه T, Awbi HB, Blomqvist C, Sandberg M, Fresh AB (2005) Effectiveness of confluent jets ventilation system for classrooms. In Proceedings of the 10th International Conference in Indoor Air Quality and Climate-Indoor Air.
- [5] Kaczmarczyk J, Melikov A, Fanger PO (2004) Human response to personalized ventilation and mixing ventilation. *Indoor Air* 14: 17-29.
- [6] Awbi HB (2003) *Ventilation of buildings*. Taylor & Francis.
- [7] Cho YJ, Awbi HB, Karimipناه T (2004) The characteristics of wall confluent jets for ventilated enclosures. *Proceedings of Roomvent 2004*, Coimbra, Portugal.
- [8] Cho Y, Awbi HB, Karimipناه T (2005) Comparison between wall confluent jets and displacement ventilation in aspect of the spreading rate on the floor. In 10th International Conference in Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2005), Beijing, China.
- [9] Cho Y, Awbi HB, Karimipناه T (2008) Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation. *Build Environ* 43(6): 1091-1100.
- [10] Janbakhsh S, Moshfegh B (2014) Experimental investigation of a ventilation system based on wall confluent jets. *Build Environ* 80: 18-31.

صورت آزمایشگاهی الگوی توزیع دما و پیش بینی احساس حرارتی و ناراضیتی ناشی از کوران مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو ارتفاع تخلیه دریچه در ۱۶۰ سانتی متری از کف (تهویه انفرادی بالاسری) و در ارتفاع ۳۰ سانتی متری از کف (تهویه انفرادی زیرمیزی) در دو دمای ۲۴ و ۱۶ درجه سلسیوس و سه زاویه مختلف برای وزش از دریچه (صفر، ۲۲/۵ و ۴۵ درجه) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که در حالت بالا سری (ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری دریچه) به ازای دمای ورودی ۲۴ درجه سلسیوس، تغییر زاویه وزش تأثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع دما تأثیری ندارد. در حالی با افزایش زاویه دریچه از صفر به ۴۵ درجه، سرعت بیشینه هوا در ناحیه حضور افراد از ۱/۵ متر بر ثانیه به حدود ۱ متر بر ثانیه می‌رسد؛ همچنین در هر دو حالت بالاسری و زیرمیزی در دمای ۲۴ درجه سلسیوس توزیع دما در محل نشستن افراد تقریباً یکسان بوده است. با نصب دریچه در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری از کف توزیع سرعت به ازای هر دو دمای ورودی، روند تقریباً مشابهی داشته است. در ارتفاع دریچه ۳۰ سانتی متری از کف در ناحیه بالا تنه افراد (از ۸۵ تا ۱۶۰ سانتی متری از کف) سرعت ناچیز بوده است. همچنین، با تغییر دما از ۱۶ به ۲۴ درجه سلسیوس در هر دو حالت دریچه، احساس حرارتی افراد در هر سه زاویه در محدوده کمی خنک و خنک قرار داشته است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در حالت دریچه بالاسری با افزایش زاویه وزش، احساس افراد به سمت منطقه خنک‌تر سوق پیدا می‌کند. ضمن اینکه شرایط حرارتی در ناحیه سر (محدوده ۱۲۰ تا ۱۶۰ سانتی متری از کف) نسبت به سایر بخش‌ها بحرانی‌تر ارزیابی شد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که با افزایش زاویه از صفر به ۲۲/۵ و ۴۵ درجه به ازای دریچه مستقر در ارتفاع ۱۶۰ سانتی متری از کف، درصد ناراضیتی در هر دو دمای ۱۶ و ۲۴ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرده است؛ اما این در حالی است که در ارتفاع دریچه ۳۰ سانتی متری از کف با افزایش زاویه دریچه، درصد ناراضیتی در هر دو دما کاهش یافته است و احساس حرارتی به محدوده کمی خنک نزدیک تر شده است. در حالت بالاسری با زاویه صفر درجه دریچه و به ازای هر دو دمای ورودی، در ناحیه پایین تنه، ناراضیتی ناشی از کوران در محدوده استاندارد قرار دارد؛ در حالی که با زاویه وزش ۴۵ درجه، در حالت زیر میزی با

- [17] Kaczmarczyk J, Zeng Q, Melikov AK, Fanger PO (2002) The effect of a personalized ventilation system on perceived air quality and SBS symptoms. In 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.
- [18] Kaczmarczyk J, Melikov A, Bolashikov Z, Nikolaev L, Fanger PO (2006) Human response to five designs of personalized ventilation. HVAC&R Res 12(2): 367-384.
- [19] Conceição EZ, Santiago CI, Lúcio M, Awbi HB (2018) Predicting the air quality, thermal comfort and draught risk for a virtual classroom with desk-type personalized ventilation systems. Buildings 8(2): 35.
- [20] Fanger PO (1970) Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press. Copenhagen, Denmark.
- [21] Ashrae AH (2009) American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc., Atlanta.
- [22] ISO I. Standard 7730. 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, ISO, Geneva. 2005.
- [11] Janbakhsh S, Moshfegh B (2014) Numerical study of a ventilation system based on wall confluent jets. HVAC&R Res 20(8): 846-861.
- [12] Arghand T, Karimipناه T, Awbi HB, Cehlin M, Larsson U, Linden E (2015) An experimental investigation of the flow and comfort parameters for under-floor, confluent jets and mixing ventilation systems in an open-plan office. Build Environ 92: 48-60.
- [13] Svensson K, Rohdin P, Moshfegh B (2015) A computational parametric study on the development of confluent round jet arrays. Eur J Mech B-Fluid 53: 129-147.
- [14] Andersson H, Cehlin M, Moshfegh B (2018) Experimental and numerical investigations of a new ventilation supply device based on confluent jets. Build Environ 137: 18-33.
- [15] Zolfaghari SA, Izadi M, Hooshmand SM, Rateghi R, Beheshtian M, Teymoori S (2020) Experimental assessment of temperature distribution and draught discomfort for a personalized CJV system. The 28th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers-ISME.
- [16] Andersson H, Kabanshi A, Cehlin M, Moshfegh B (2020) On the Ventilation performance of low momentum confluent jets supply device in a classroom. Energies 13(20): 5415.