

# ارزیابی تأثیر الگوی وزشی سیستم تهویه انفرادی بر احساس گرمایی موضعی بدن

سید علیرضا ذوالفقاری\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، zolfaghari@birjand.ac.ir

رویا راتقی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، roya.rateghi@birjand.ac.ir

مهدی افزلیان

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، mahdiafzalian@yahoo.com

## چکیده

تحقیق حاضر باهدف تحلیل تأثیر جانمایی دریچه ورود هوا و مشخصه‌های جریان بر عملکرد یک سیستم تهویه انفرادی صورت پذیرفته‌است. به‌این منظور یک اتاق اداری مجهز به سیستم تهویه‌انفرادی باحضور آدمک گرمایی، به‌صورت عددی شبیه‌سازی شده‌است. برای دریچه ورود هوا سه جانمایی مختلف (مقابل پا، مقابل شکم و مقابل صورت) و برای هر جانمایی دو دمای هوای ورودی (۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس) و دو سرعت وزش (۱ و ۲ متر بر ثانیه) درنظر گرفته‌شده‌است. در نهایت، توزیع دما، توزیع سرعت هوا و احساس گرمایی کلی و موضعی بخش‌های مختلف بدن تعیین شده‌است. در برخی حالت‌ها با تغییر جانمایی دریچه از مقابل پا به‌مقابل شکم و سر، احساس کلی بدن به‌ترتیب تا ۰/۵۴ و ۰/۶ واحد خنک‌تر شده‌است. در تمام حالت‌ها دست و سر احساس خنک‌تری نسبت به احساس کل بدن داشته‌اند که نشان‌می‌دهد در سیستم تهویه انفرادی، برهنگی تأثیر قابل توجهی بر احساس عضو دارد. سر برخلاف پا، یک عضو موثر برای سرمایش غیریکنواخت در شرایط گرم بوده و به دلیل تأثیر آن بر احساس کلی بدن، سرمایش سر می‌تواند راهکاری موثر برای کاهش مصرف انرژی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تهویه غیریکنواخت، جانمایی دریچه ورودی، تهویه انفرادی، احساس گرمایی موضعی، آسایش گرمایی، سیستم‌های آسایش انفرادی.

## Evaluating the effect of air flow pattern from a personalized ventilation system on the body local thermal sensation

S. A. R. Zolfaghari  
R. Rateghi  
M. Afzalian

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

## Abstract

The present study aimed to investigate the effects of air inlet location and flow characteristics on the performance of a personalized ventilation system. For this purpose, a near-body personalized ventilation system is numerically simulated in an office room with the presence of a thermal manikin. Three air inlet arrangements (in front of the feet, in front of the abdomen, in front of the face) were modeled, two air temperatures (16 and 20°C) and two air velocities (1 and 2m/s) were assigned to each arrangement. Finally, airflow temperature distribution, velocity distribution, and the overall and local temperature and thermal sensation of different body segments are determined. In some cases, by changing the air inlet placement from the front of the feet to the abdomen and head, the whole-body thermal sensation is cooled by 0.54 and 0.6 units, respectively. In all cases, hands and head felt cooler than the whole-body thermal sensation, which shows that the bareness of a segment has a significant effect on its feeling in personalized ventilation systems. Unlike the foot, the head is an effective local segment for non-uniform cooling purposes in warm conditions, and due to its effect on the whole-body thermal sensation, cooling the head would be an effective way to reduce energy consumption.

**Keywords:** Non-uniform Ventilation, Air Inlet Position, Personalized Ventilation, Local Thermal Sensation, Thermal Comfort, Personal Comfort Systems.

## ۱- مقدمه

تهویه اختلاطی<sup>۱</sup> و غیریکنواخت طبقه‌بندی کرد[۱]. از جمله انواع سیستم‌های تهویه غیریکنواخت می‌توان به تهویه جابجایی<sup>۲</sup>، توزیع هوای زیر سطحی<sup>۳</sup> [۲، ۳]، لایه‌ای<sup>۴</sup>، جت‌های هم‌ریز<sup>۵</sup> [۴] یا جت‌های برخوردی<sup>۶</sup>، متصل به دیوار<sup>۷</sup> [۵]، استراتژی جت هوای متناوب<sup>۸</sup> [۶، ۷] و تهویه انفرادی<sup>۹</sup> [۸] اشاره کرد.

از میان سیستم‌های تهویه غیریکنواخت، سیستم تهویه انفرادی به

به طور کلی تهویه یک ساختمان با هدف تأمین هوای تازه و دستیابی به توزیع دمای مناسب برای ارتقای شرایط آسایش ساکنان انجام می‌گیرد. سرعت هوای داخل، رطوبت نسبی و دمای عملکردی از جمله عوامل کنترلی در تهویه مطبوع می‌باشد که همه و یا تعدادی از آن‌ها بسته به نوع نیاز کنترل می‌شوند. بر همین اساس، سیستم‌های مختلف تهویه، متناسب با نوع کاربری هر مکان طراحی و اجرا می‌شوند. طی چندین دهه گذشته، توزیع موثر جریان هوا در محیط‌های داخلی با هدف جبران بارهای گرمایی و تهویه‌ای همراه با بهینه‌سازی مصرف انرژی، مورد توجه محققان بوده است. بر اساس مشخصه‌های جریان هوا، روش‌های تهویه را می‌توان به دو دسته یکنواخت (مانند

<sup>1</sup> Mixing Ventilation

<sup>2</sup> Displacement Ventilation

<sup>3</sup> Under-Floor Air Distribution

<sup>4</sup> Stratum Ventilation

<sup>5</sup> Confluent Jets Ventilation

<sup>6</sup> Impinging jet Ventilation

<sup>7</sup> Wall Attached Ventilation

<sup>8</sup> Intermittent Air Jet Strategy

<sup>9</sup> Personalized Ventilation

دلیل مصرف انرژی پایین و نیز تأثیر مستقیم بر شرایط آسایش گرمایی افراد، در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، سیستم تهویه انفرادی با ورزش مستقیم هوا به ناحیه حضور فرد، باعث نفوذ هوا به لایه گرمایی اطراف بدن و ارتقای کیفیت هوای تنفسی می‌شود [۹]. همچنین، این سیستم دارای ویژگی‌هایی از جمله امکان تنظیم انفرادی جهت و شدت ورزش هوا و نیز تنظیم دمای ورودی است. ضمن اینکه قابلیت تنظیم انفرادی داده شده به کاربر در سیستم تهویه انفرادی باعث افزایش آسایش کاربران می‌شود [۱۰]. تهویه انفرادی اگر به درستی طراحی و اجرا شود، می‌تواند محیط گرمایی با کیفیت مناسبی را در اطراف بدن انسان فراهم آورد [۱۰]. اما میزان ارتقای کیفیت هوا و شرایط آسایش گرمایی به عوامل مختلفی از جمله طراحی سیستم تهویه انفرادی، موقعیت آن نسبت به کاربر، نرخ و جهت ورزش جریان هوا، دمای ورزش و اختلاف آن با دمای محیط وابسته است [۱۱، ۱۲]. سیستم‌های تهویه انفرادی خود نیز به انواع مختلف تهویه رومیزی [۸، ۱۳]، روی سقفی و بالای سر [۱۴]، در مجاورت پا، از کنار فرد، خنک یا گرم کننده دست [۱۵] و صندلی تهویه انفرادی [۱۰، ۱۶، ۱۷] تقسیم‌بندی می‌شوند. ضمن اینکه این سیستم را می‌توان در ترکیب با سایر سیستم‌های تهویه و یا به صورت جداگانه به کار گرفت.

در سال‌های اخیر، بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه انفرادی به دلیل کاهش مصرف انرژی، قابلیت کنترل فردی و ایجاد آسایش مورد توجه محققان قرار گرفته است. ملیکو و همکاران [۱۲] تحت شرایط آزمایشگاهی پنج دریچه تهویه انفرادی مختلف را از نظر کیفیت هوای تنفسی و آسایش گرمایی بررسی و با حالت بدون تهویه انفرادی مقایسه کردند و در نهایت ضریبی برای دمای معادل کل بدن به دست آوردند. کازمیزیک و همکاران [۱۸] پاسخ افراد به ۵ طراحی مختلف دریچه هوای انفرادی را تحت دماهای مختلف و کیفیت هوای متفاوت اتاق بررسی کردند و نتیجه گرفتند که همه دریچه‌های مورد آزمایش کیفیت هوای دریافتی را بهبود بخشیدند. از مزایای این سیستم توزیع یکنواخت هوا، سرعت جت کمتر و شدت اغتشاش کم بود. کواوا و همکاران [۱۹] احساس گرمایی و شرایط آسایش افراد را برای صندلی خنک کننده به عنوان یک سیستم تهویه مطبوع انفرادی در دو محیط اداری مختلف روی نمونه‌های انسانی سنجیدند و مشاهده کردند که کارمندان در اکثر اوقات جهت جریان را به سمت بازوهایشان و به دنبال آن کنار بدن، گردن و قفسه سینه هدایت می‌کنند. ژانگ و همکاران [۲۰] یک سیستم جدید توزیع هوای انفرادی برای کابین هواپیما ارائه دادند. در این سیستم دریچه‌ی هوای انفرادی روی دسته صندلی تعبیه شده و هوای گرم را تأمین کرده و همزمان سیستم تهویه جابجایی زیر راهروها به عنوان تهویه زمینه‌ای عمل می‌کند. نتایج آزمایشگاهی و عددی این تحقیق نشان داده است که سیستم انفرادی پیشنهاد شده در ترکیب با سیستم تهویه اختلاطی، توانایی خوبی در جلوگیری از ورود آلودگی‌های ایجاد شده در هر ارتفاعی به ناحیه تنفس مسافر داشته است. فنگ و همکاران [۲۱] به بررسی آزمایشگاهی اثر نازل هوای انفرادی بر آسایش گرمایی قسمت‌های مختلف بدن انسان در یک کابین هواپیما پرداختند. ایشان نتیجه گرفتند که با خنک کردن بالاتنه، تغییر محسوس در احساس گرمایی موضعی و کلی و میانگین دمای پوست ایجاد می‌شود. رحمتی و همکاران [۲۲] عملکرد یک

سیستم ترکیبی تهویه زیرسطحی و تهویه انفرادی ارتقاء یافته بر پایه میز کار به نام DDV+ را بررسی کردند. ایشان حالت‌های مختلف برای تهویه زیرسطحی و DDV+ را به صورت جداگانه و ترکیبی مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که سیستم ترکیبی احتمال ایجاد ناراحتی ناشی از کوران را در اطراف پاها کاهش داده و میدان سرعت مطلوبی در مقابل ساکنان فراهم آورده است. همچنین، کیفیت هوای داخل برای حالت ترکیبی در مقایسه با عملکرد جداگانه سیستم‌ها افزایش و مصرف انرژی نیز در مقایسه با تهویه اختلاطی حدود ۱۷ درصد کاهش یافته است. دیمی و همکاران [۲۳] تأثیر زاویه و سرعت ورزش هوا بر آسایش گرمایی و مصرف انرژی را در یک سیستم سرمایش انفرادی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که سرعت ورزش ۱ متر بر ثانیه با دمای حدود ۲۰ درجه سلسیوس شرایط آسایش گرمایی کاملاً مطلوب را با پایین‌ترین میزان مصرف انرژی در مقایسه با سایر حالت‌ها فراهم کرده است. صاحب و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۰ به بررسی عددی یک سیستم تهویه انفرادی در ترکیب با تهویه اختلاطی پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که استفاده از تهویه انفرادی همراه با تهویه اختلاطی کارآمدتر از تهویه اختلاطی به تنهایی بوده است و این سیستم کیفیت هوای دریافتی و آسایش گرمایی را به طور قابل توجهی بهبود داده است. ذوالفقاری و همکاران [۲۵] با بررسی آزمایشگاهی یک سیستم تهویه انفرادی برای یک جانمایی ثابت دریچه، دریافتند که تا فاصله افقی حدود ۱۱۰ سانتی‌متر از دریچه ورود هوا، اثر مومنوم جت و تأثیر آن بر سرعت هوا در اتاق و در نتیجه بر احساس گرمایی افراد چشمگیر است.

تحقیقات پیشین نشان می‌دهد، گسترش استفاده از سیستم تهویه انفرادی در محیط‌های داخلی نیازمند تحقیق و بررسی عملکرد این سیستم با تعیین احساس و آسایش گرمایی ساکنان است. به دلیل ورزش مستقیم هوا به سمت بدن، امکان ایجاد ناراحتی موضعی برای کاربران سیستم تهویه انفرادی نسبت به سایر سیستم‌ها بالاتر می‌باشد. لذا طراحی و جانمایی دریچه ورود هوا در این مدل تهویه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر، از آن جایی که حساسیت گرمایی بخش‌های مختلف بدن متفاوت است، ورزش به اعضای مختلف می‌تواند تأثیر متفاوتی بر آسایش گرمایی کلی فرد داشته باشد. با توجه به شرایط غیریکنواختی که این سیستم بر بخش‌های مختلف بدن ایجاد می‌کند، استفاده از مدل‌های غیربخشی مانند فنگر [۲۶] و گگی [۲۷] (مطابق با آنچه تحقیقات پیشین انجام داده‌اند)، نمی‌تواند تخمین درستی از احساس و رضایت فرد و در نهایت عملکرد این سیستم ارائه دهد. لذا ضروری است که شرایط آسایش گرمایی کاربران با استفاده از مدل‌های آسایش موضعی بررسی شود. در این تحقیق تأثیر الگوی ورزش هوای سیستم تهویه انفرادی به بخش‌های مختلف بدن (با سه جانمایی مختلف برای دریچه‌های تهویه خطی) بر احساس موضعی و کلی بدن به ازای دو سرعت و دو دمای ورزشی متفاوت بررسی شده است. به این منظور پارامترهای محیطی با کمک حل عددی معادلات جریان استخراج شده و از مدل تنظیم حرارت برای محاسبه دمای پوست و مرکز بدن استفاده شده است. همچنین، با استفاده از مدل ارزیابی

<sup>1</sup> Improved Desk Displacement Ventilation

### ۳- معادلات حاکم

#### ۳-۱- معادلات جریان

معادلات جریان حاکم بر مساله شامل معادلات بقای جرم، مومنوم و انرژی (معادلات (۱) تا (۵)) می باشد که با فرض جریان پایا، تراکم ناپذیر و مغشوش و همچنین ثابت بودن خواص سیال در نظر گرفته شده اند. برای تعیین ماهیت جریان از دو معیار عدد رینولدز (در نزدیکی دریچه به دلیل غالب بودن جابجایی اجباری) و عدد رایلی (در سایر فضای اتاق به دلیل غالب بودن جابجایی آزاد) استفاده شده است که هر دو در محدوده جریان آشفته به دست آمده اند.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) - \rho g_i \beta (\bar{T} - T_{ref}) \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = k \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i' \bar{T}') + S_t \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_k}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_k}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \varepsilon \frac{P_k}{k} - C_{2\varepsilon} \varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

یکی از پر کاربردترین مدل های توربولانسی که با توجه به دقت قابل قبول و همچنین زمان حل کوتاه به طور گسترده در مسائل مختلف مهندسی مورد استفاده قرار می گیرد، مدل توربولانس k-ε استاندارد می باشد. این مدل به منظور مدل سازی جریان داخل ساختمان با تهویه مکانیکی علاوه بر دقت قابل قبول، زمان حل مناسبی دارد. لذا در این تحقیق از مدل مرسوم k-ε استاندارد برای مدل سازی جریان توربولانس بهره گرفته شده است.

برای جفت شدگی معادلات نیز از تقریب بوزینسک و همچنین برای ارتباط میان معادلات پیوستگی و مومنوم از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. برای گسسته سازی ترم های معادلات از طرح UPWIND با تقریب مرتبه دوم و برای تمام جملات پخش از تقریب مرتبه دوم مرکزی استفاده شده است.

#### ۳-۲- معادلات آسایش گرمایی

برای ارزیابی شرایط دمایی و گرمایی بخش های مختلف بدن، مدل موضعی JOSTB توسعه یافته توسط افضلیان و ذوالفقاری [۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل بدن به ۱۷ بخش و سه لایه (مرکز، زیر و روپوست) تقسیم شده و همچنین سیستم گردش خون متشکل از سرخرگ، سیاهرگ و سیاهرگ های سطحی مدل سازی شده است. در نهایت با استفاده از رابطه ۶ توزیع دمای بافت بخش های مختلف به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{C(i,j)}{Vol(i,j)} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = k(i,j) \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{Q_{met}(i,j)}{Vol(i,j)} + \frac{BF(i,j) \rho_{bl} C_{bl} (T_{ar}(t) - T_i)}{Vol(i,j)} \quad (6)$$

در این مقاله از ذکر جزئیات مدل فوق صرف نظر شده و علاقه مندان می توانند برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۲۸] مراجعه نمایند. با استفاده از این مدل می توان دمای بخش های مختلف بدن را پیش بینی کرد. نهایتاً با کمک دماهای پیش بینی شده احساس گرمایی

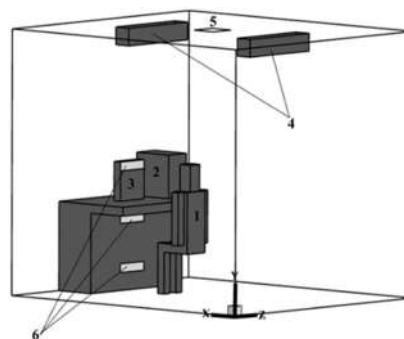
احساس گرمایی، احساس بخش های مختلف بدن محاسبه گردیده است.

#### ۲- فضای نمونه

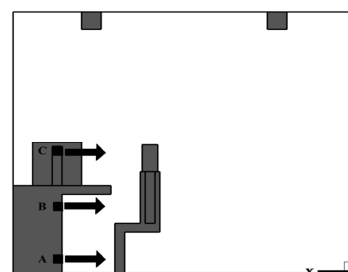
هندسه مورد بررسی مطابق شکل ۱، فضای یک اتاق اداری متداول به ابعاد ۳ × ۳/۵ متر مربع و ارتفاع ۳ متر با تجهیزاتی مانند میز کار، رایانه شامل کیس و نمایشگر، ۲ عدد لامپ روشنایی روی سقف و یک آدمک شبیه سازی شده است. مشخصات هر کدام از اجزا شبیه سازی شده در جدول ۱ بیان شده است. همچنین، یک دریچه خروج هوا به ابعاد ۰/۳ × ۰/۳ متر مربع در وسط سقف تعبیه شده است که با توجه به نیروی شناوری جریان و حرکت هوای آلوده به سمت بالای اتاق، راهکار مناسبی به منظور دفع آلاینده ها از ناحیه حضور افراد می باشد. دریچه ورود هوا به ابعاد ۰/۴ × ۰/۱ متر مربع در نزدیکی بدن آدمک، در فاصله افقی کمتر از ۱ متر از آن و در سه ارتفاع مختلف مقابل یا (حالت A در ارتفاع ۰/۲۵ متر از کف)، مقابل شکم (حالت B در ارتفاع ۰/۸ متر از کف) و مقابل صورت مانکن (حالت C در ارتفاع ۱/۴ متر از کف) مطابق شکل ۱ قرار گرفته است. برای هر دریچه ورودی ۲ دما (۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس) و ۲ سرعت وزش (۱ و ۲ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی و گرمایی اجزا اتاق

| ردیف | نام            | تعداد | توان گرمایی (وات) |
|------|----------------|-------|-------------------|
| ۱    | مانکن گرمایی   | ۱     | ۱۰۵               |
| ۲    | کیس            | ۱     | ۹۰                |
| ۳    | مانیتور        | ۱     | ۶۰                |
| ۴    | لامپ روشنایی   | ۲     | ۵۰                |
| ۵    | دریچه خروج هوا | ۱     | -                 |
| ۶    | دریچه ورود هوا | ۱     | -                 |



(الف)



(ب)

شکل ۱- فضای نمونه مورد بررسی؛ (الف) هندسه و تجهیزات اتاق مورد بررسی، (ب) جانمایی دریچه های ورود هوا

هر بخش تخمین زده می‌شود. برای این منظور مدل‌های مختلفی ارائه شده است که در تحقیق حاضر، مدل ارائه شده توسط جین و همکاران [۲۹] و رابطه (۷) برای پیش‌بینی احساس گرمایی مورد استفاده قرار گرفته است.

$$TSV_i = \begin{cases} +3 & \Delta T_i > \ln 4 / W_i \\ [exp(W_i \Delta T_i) - 1] - (k_{1,i} \Delta T_i + A_i) \Delta T_{mean} & 0 \leq \Delta T_i \leq \ln 4 / W_i \\ [1 - exp(C_i \Delta T_i)] - (k_{2,i} \Delta T_i + A_i) \Delta T_{mean} & \ln 4 / C_i \geq \Delta T_i \geq 0 \\ -3 & \Delta T_i < \ln 4 / C_i \end{cases} \quad (7)$$

در این رابطه،  $W_i$ ،  $C_i$ ،  $k_{1,i}$ ،  $k_{2,i}$  و  $A_i$  ضرایب رگرسیون برای هر بخش می‌باشند که مقادیر آن‌ها در جدول موجود در مرجع [۲۹] بیان شده است.  $\Delta T_i$  اختلاف دمای پوست هر بخش با دمای خنثی پوست در همان بخش می‌باشد. ضمناً،  $\Delta T_{mean}$  نیز از اختلاف دمای متوسط پوست و دمای میانگین خنثی پوست به دست می‌آید.

در نهایت پس از استخراج احساس گرمایی موضعی، احساس گرمایی کلی بدن با میانگین‌گیری احساس موضعی اعضا به کمک ضرایب وزنی موجود در جدول ۱۰ مرجع [۲۹] و با در نظر گرفتن قفسه سینه به عنوان عضو تحت وزش مستقیم، محاسبه شده است.

#### ۴- روش و ابزار تحقیق

برای ایجاد شبکه و حل مساله از نرم‌افزار ایرپک (ویرایش ۳،۰،۱۶) استفاده شده که یک بستر دقیق، سریع و ساده برای حل مسائل مربوط به جریان هوای داخل ساختمان، کیفیت هوا و آسایش گرمایی است. شبیه‌سازی هندسه مورد نظر، اعمال شرایط مرزی و حل معادلات جریان با این نرم‌افزار انجام شده است.

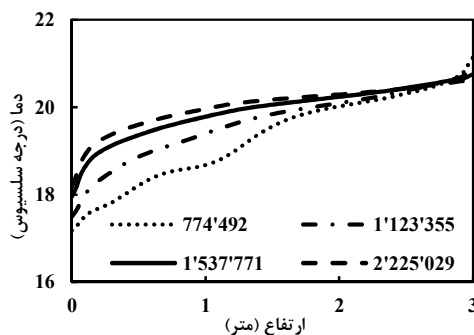
برای دستیابی به یک رویکرد مدل‌سازی نزدیک دیوار که دارای دقت روش استاندارد دو لایه<sup>۱</sup> برای مش‌های ریز نزدیک دیوار باشد و نیز دقت مش‌های عملکرد دیوار<sup>۲</sup> را به میزان قابل توجهی کاهش ندهد، مدل دو لایه را با عملکرد دیوارهای بهبود یافته<sup>۳</sup> ترکیب می‌کند و روش بهبود یافته دیوار<sup>۴</sup> نتیجه می‌شود.

برای ارزیابی شرایط دمایی و گرمایی بخش‌های مختلف بدن، مدل موضعی JOSTB توسعه یافته توسط افضلیان و ذوالفقاری [۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است که به صورت کد در بستر فرترن نوشته شده است. با استفاده از این مدل می‌توان دمای بخش‌های مختلف بدن را پیش‌بینی کرد. نهایتاً با کمک دماهای پیش‌بینی شده، احساس گرمایی هر بخش تخمین زده شده است که برای این منظور مدل ارائه شده توسط جین و همکاران [۲۹] و رابطه (۷) مورد استفاده قرار گرفته است که این مدل نیز به صورت کد در بستر فرترن نوشته شده است.

#### ۵- اعتبارسنجی و شبکه‌بندی

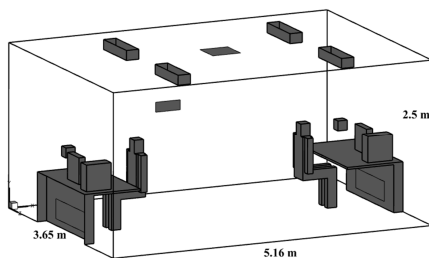
برای حل مسئله یک شبکه نرم سازمان یافته ایجاد شده که در نواحی با گرادیان دما یا سرعت زیاد مانند دریچه‌های ورود و خروج و در مجاور منابع گرمایی، تراکم آن افزایش داده شده است. ابتدا مساله با شبکه‌ای درشت شامل ۷۷۴ هزار سلول حل شده و

نمودار توزیع دما در راستای خط عمودی در امتداد  $x = 2/18m$  و  $m = 1/9$  z رسم شده است. سپس با ریزتر کردن شبکه به شبکه‌هایی شامل  $1/123$  میلیون،  $1/537$  میلیون و  $2/537$  میلیون سلول، توزیع دما بر حسب ارتفاع در امتداد خط عمودی ذکر شده رسم شده است. باتوجه به Error! Reference source not found. ۲ مشاهده می‌شود که نمودارهای توزیع دما به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک شده و در نتیجه شبکه شامل  $1/537$  میلیون سلول باید به عنوان شبکه مناسب برای حل مسئله انتخاب شود.



شکل ۲- نمایش استقلال حل از شبکه

برای اطمینان از صحت حل معادلات حاکم بر مساله توسط حلگر مورد استفاده، نتایج حاضر با نتایج تحقیق رحمتی و همکاران [۲۲] مورد مقایسه قرار گرفته است. فضای مورد بررسی ایشان اتاقی به ابعاد  $2/5 \times 3/65 \times 5/16$  متر شامل دو آدمک شبیه‌سازی شده و دو سری تجهیزات اداری شامل میز کار و رایانه در دو طرف اتاق و سایر منابع گرمایی از جمله لامپ‌های روشنایی (شکل ۳) است. در شکل ۴ نتایج مربوط به نمودارهای توزیع دما و سرعت در دو امتداد مختلف بین تحقیق حاضر با تحقیق رحمتی و همکاران [۲۲] مقایسه شده است و همخوانی مناسبی میان نتایج مذکور مشاهده می‌شود. خطای مطلق در دو راستای ارائه شده برای دما و سرعت به ترتیب  $0/38^\circ C$  و  $m/s$  و  $0/19$  می‌باشد که با توجه به محدوده تغییرات این دو کمیت، مقادیر قابل قبولی است. تفاوت حاصل می‌تواند ناشی از در دسترس نبودن تمام اطلاعات مربوط به جزئیات در مقاله و تفاوت اندک در مدل‌سازی باشد.



شکل ۳- فضای نمونه تحقیق رحمتی و همکاران [۲۲]

<sup>1</sup> standard two-layer approach

<sup>2</sup> wall function meshes

<sup>3</sup> enhanced wall functions

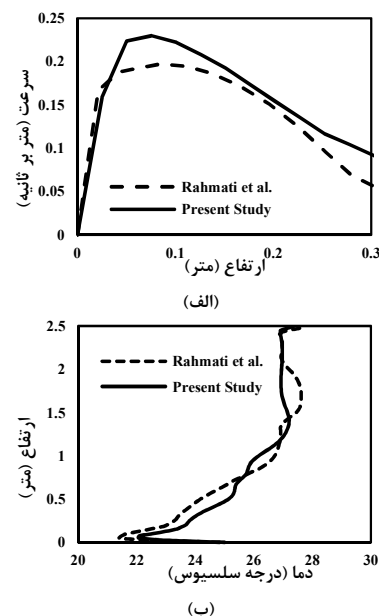
<sup>4</sup> enhanced wall treatment

برای محاسبه دما و احساس گرمایی موضعی و کلی بدن، مقادیر دما و سرعت هوا در اطراف بدن آدمک از نتایج حل عددی استخراج شده و به عنوان ورودی در مدل تنظیم دما JOSTB [۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است. احساس گرمایی موضعی و کلی بدن با کمک مدل جین و همکاران [۲۹] برای یک محیط اداری (فعالیت اداری و پوشش اداری رسمی) محاسبه شده است. در نهایت دمای پوست و احساس گرمایی موضعی برای ۱۲ حالت مختلف مساله محاسبه و در شکل ۶ نمایش داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۶، مشاهده می‌شود که در جانیمایی A، B و C به ترتیب، کمترین دما متعلق به بخش‌های پایین تنه (مانند پا)، میان‌تنه (بازو و دست) و بالاتنه (سر) می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف دما بین اعضای بدن در حالت ۲-۱۶ به میزان حدود ۱۲ درجه سلسیوس بین گرم‌ترین و خنک‌ترین عضو و کمترین اختلاف در حالت ۱-۲۰ به میزان حدود ۳ درجه سلسیوس اتفاق افتاده است. ضمناً مشاهده می‌شود بخش لگن با دمای حدود ۳۶ درجه سلسیوس در همه حالت‌ها دمای بالاتری نسبت به سایر اعضا داشته و در هیچ یک از چهار نمودار، دمای این عضو به جانیمایی درجه وابسته نیست. باتوجه به نتایج تحقیق ژانگ و همکاران [۳۰]، گرم بودن لگن وقتی بدن خنک است، یعنی در حالت گرمایش، احساس خوشایندی دارد. اما افراد مورد آزمایش خنک بودن لگن حتی در حالت سرماییش را مطلوب گزارش نکرده‌اند. لذا دمای بالای لگن در تحقیق حاضر منجر به احساس نامطلوب و نارضایتی ساکنان نمی‌شود.

همچنین، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف دمای اعضا برای جانیمایی B بین دمای دست و لگن، برای جانیمایی C در دمای ۱۶ درجه سلسیوس بین دست و لگن و در دمای ۲۰ درجه سلسیوس بین سر و لگن بوده است. نتایج حاکی از آن است که به ازای دمای ورودی ۱۶ درجه سلسیوس، دمای موضعی دست از سایر اعضا کمتر بوده، اما برای دمای ۲۰ درجه سلسیوس کمترین دمای موضعی به جانیمایی درجه وابسته است. پایین بودن دمای دست در بیشتر موارد به علت برهنه بودن این عضو و نیز شرایط ترموفیزیکی آن است. اختلاف دمای سر بین دو جانیمایی B و C در همه حالت‌ها کمتر از ۱ درجه سلسیوس بوده و اختلاف احساس گرمایی سر برای این دو جانیمایی نیز کمتر از ۱ واحد است.

در حالت ۲-۱۶-۲۰ C با اینکه دمای سر و دست حدود ۵ درجه سلسیوس اختلاف داشته‌اند، اما احساس گرمایی این دو عضو مشابه بوده است. همچنین، در حالت ۱-۲۰ با اینکه دمای پا برای همه جانیمایی‌ها بالاتر از دمای ساق پا گزارش شده است، اما احساس گرمایی آن خنک‌تر از احساس گرمایی ساق پا بوده است. علت این امر آن است که احساس گرمایی هر بخش به اختلاف دمای موضعی همان بخش با دمای هدف آن وابسته است. به طور مثال اگرچه ممکن است دمای یک بخش بدن از بخشی دیگر کمتر باشد، اما اگر اختلاف دمای موضعی با دمای هدف کمتر باشد، احساس گرمایی آن مقدار بیشتری به دست آید.

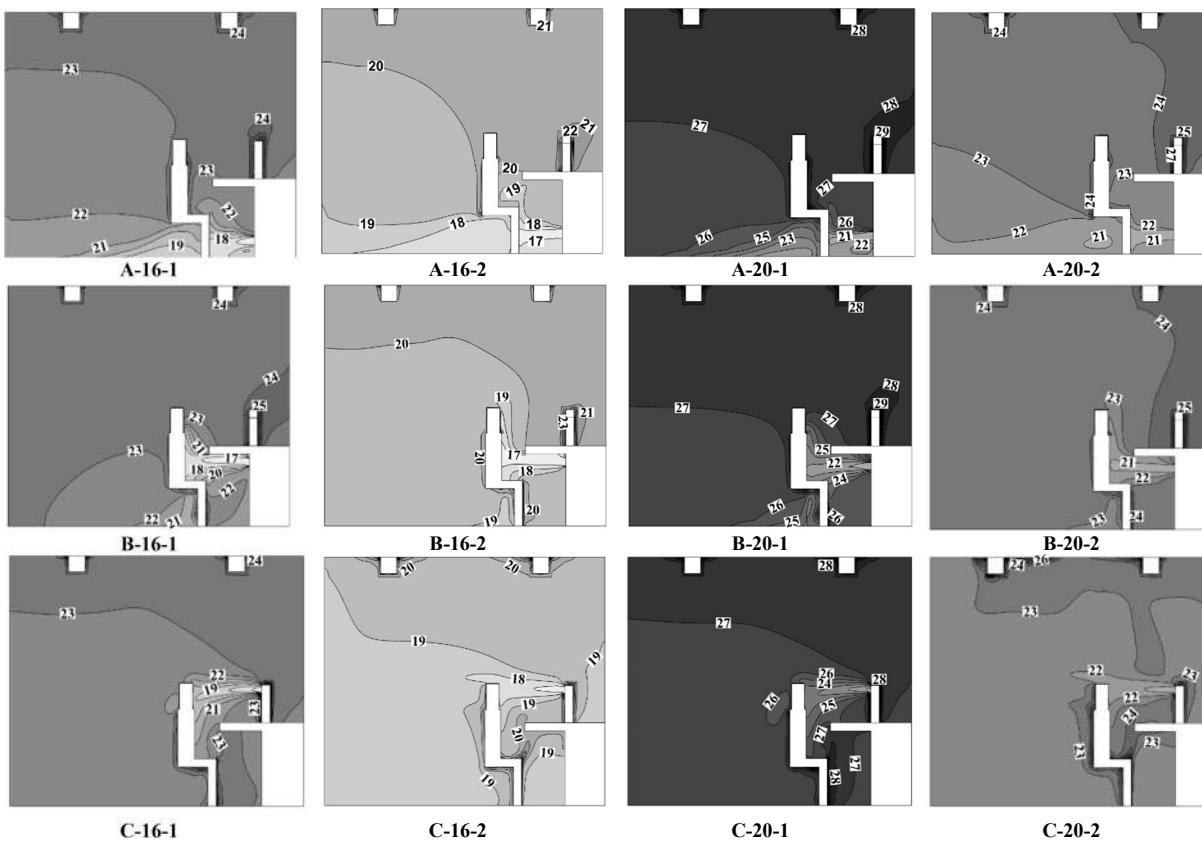


شکل ۴- نتایج تحقیق حاضر و تحقیق رحمتی و همکاران [۲۲]  
(الف) سرعت در صفحه میانی مقابل پای مانکن  $X=1/1$   $Z=1/8$ ، (ب)  
دما در سمت راست مانکن  $X=1/2$   $Z=1/3$

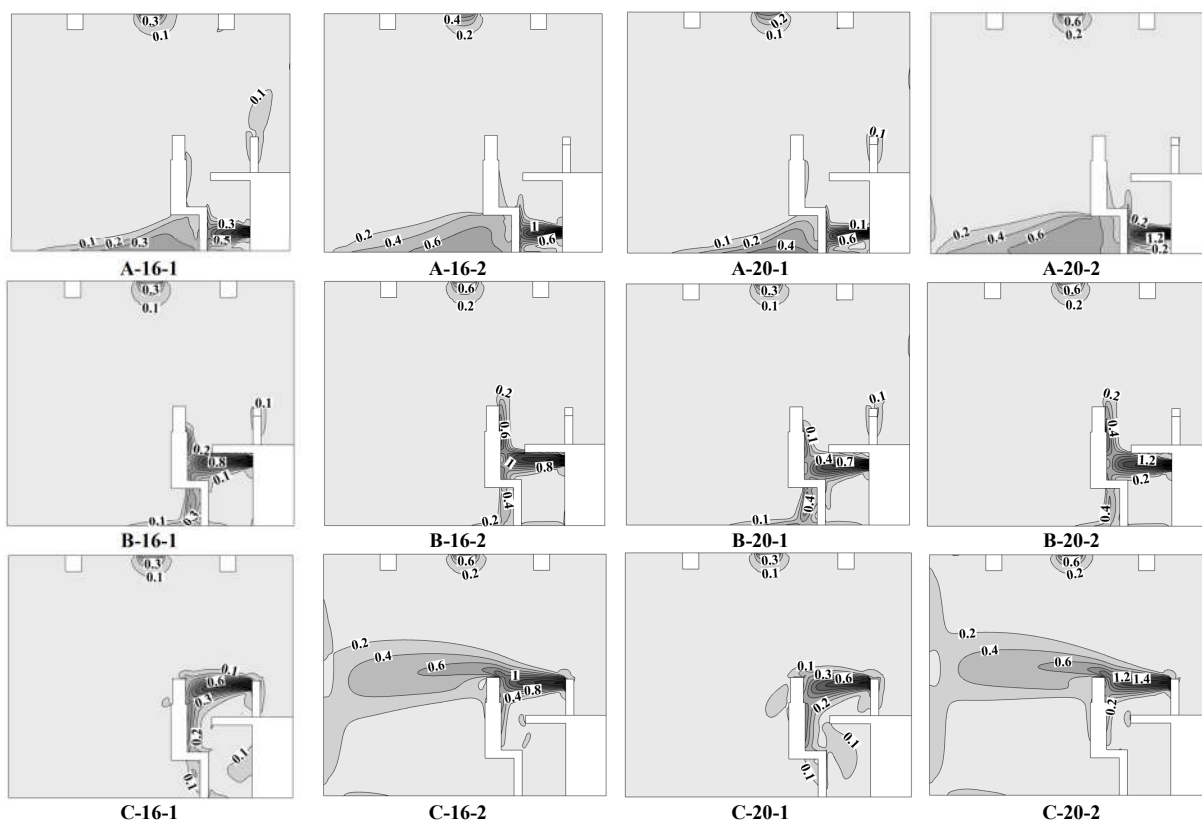
## ۶- نتایج

در تحقیق حاضر توزیع سرعت، دما و احساس گرمایی موضعی تحت سیستم تهویه انفرادی نزدیک به بدن در حالت سرماییش برای سه جانیمایی مختلف درجه، دو دمای ورزش ۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس و دو سرعت ورزش ۱ و ۲ متر بر ثانیه (مجموع ۱۲ حالت مختلف) ارائه و بررسی شده است. درجه‌های ورود هوا نزدیک به بدن آدمک و در سه ارتفاع مختلف  $A=0/25$ ،  $B=0/8$  و  $C=1/4$  متر از سطح زمین قرار گرفته‌اند که به ترتیب مقابل پا (A)، شکم (B) و صورت (C) می‌باشد. نحوه نام‌گذاری این ۱۲ حالت به ترتیب جانیمایی-دما-سرعت درجه ورود هوا از چپ به راست است. به طور مثال حالت ۲-۱۶-۲۰ A به معنای آن است که درجه ورودی در وضعیت نزدیک پا، با دمای ورزش ۱۶ درجه سلسیوس و سرعت ۲ متر بر ثانیه است.

شکل ۵ توزیع دما و سرعت را در صفحه میانی اتاق برای همه حالت‌ها نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با اعمال سرعت ۲ متر بر ثانیه برای جریان هوای ورودی، به دلیل افزایش نرخ تعویض هوا، میانگین دمای هوای اتاق در مقایسه با سرعت ۱ متر بر ثانیه کاهش یافته است. برای جانیمایی حالت A یعنی قرار دادن درجه در مقابل پا، فضای بیشتری از پایین اتاق تحت تاثیر قرار گرفته است و این جانیمایی باعث لایه‌ای شدن هوای اتاق شده است. همچنین، جانیمایی B کمترین و جانیمایی C بیشترین سهم را در خنک کردن فضای پشت فرد داشته‌اند. بر اساس نمودارهای توزیع دما، یکنواخت‌ترین شرایط دمای هوای اطراف بدن در حالت جانیمایی درجه B یعنی مقابل شکم به دست آمده است. باتوجه به نمودارهای توزیع سرعت، در جانیمایی B و C علاوه بر ناحیه صورت، ورزش در ناحیه شکم و پاها نیز احساس شده است. اما در جانیمایی A ورزش کمتری در ناحیه شکم و صورت احساس شده و بیشترین تمرکز ورزش بر ناحیه پاها می‌باشد.

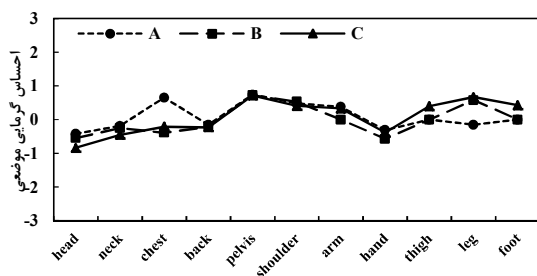


(الف) توزیع دو بعدی دما در صفحه میانی فضای نمونه

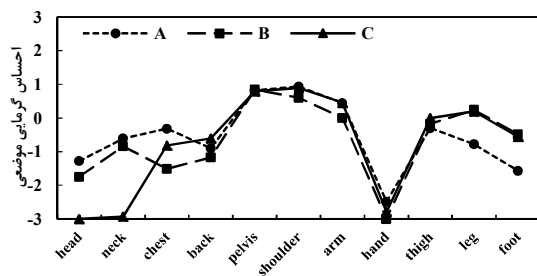


(ب) توزیع دو بعدی سرعت در صفحه میانی فضای نمونه

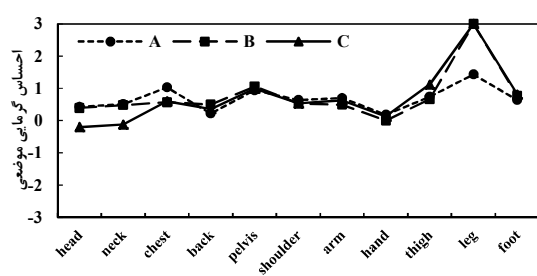
شکل ۵- توزیع دو بعدی سرعت و دمای جریان هوا در صفحه  $xy$  با مختصات  $z = 1/5$



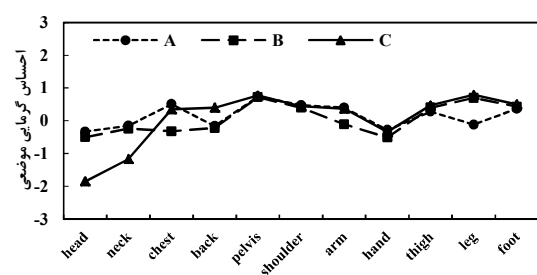
(الف) احساس موضعی پوست به ازای حالت ۱-۱۶ (سرعت ۱ m/s و دمای ورودی ۱۶°C)



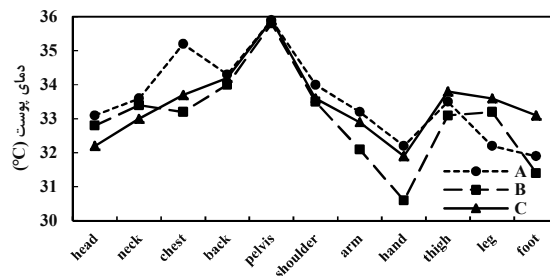
(ب) احساس موضعی پوست به ازای حالت ۲-۱۶ (سرعت ۲ m/s و دمای ورودی ۱۶°C)



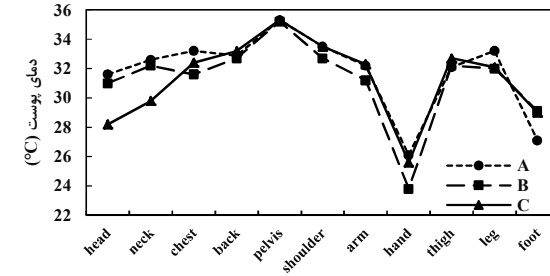
(ج) احساس موضعی پوست به ازای حالت ۱-۲۰ (سرعت ۱ m/s و دمای ورودی ۲۰°C)



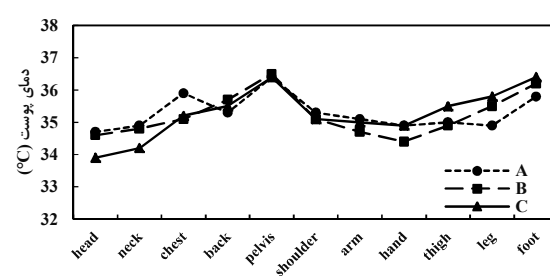
(د) احساس موضعی پوست به ازای حالت ۲-۲۰ (سرعت ۲ m/s و دمای ورودی ۲۰°C)



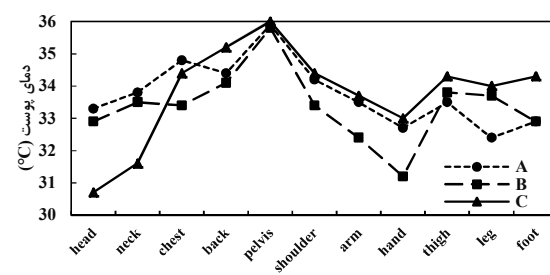
(الف) دمای موضعی پوست به ازای حالت ۱-۱۶ (سرعت ۱ m/s و دمای ورودی ۱۶°C)



(ب) دمای موضعی پوست به ازای حالت ۲-۱۶ (سرعت ۲ m/s و دمای ورودی ۱۶°C)



(ج) دمای موضعی پوست به ازای حالت ۱-۲۰ (سرعت ۱ m/s و دمای ورودی ۲۰°C)



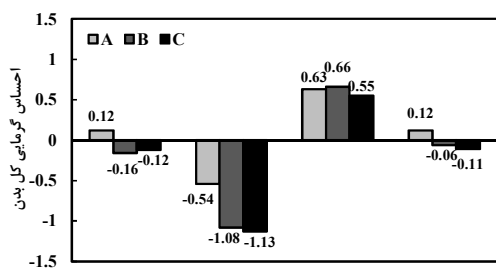
(د) دمای موضعی پوست به ازای حالت ۲-۲۰ (سرعت ۲ m/s و دمای ورودی ۲۰°C)

شکل ۶- دمای پوست و احساس گرمایی موضعی اعضای مختلف بدن برای سه جانیایی متفاوت دریچه و به ازای دو حالت دمای ورودی و دو حالت سرعت وزشی

۱ بوده است.

در نهایت پس از استخراج احساس گرمایی موضعی، احساس گرمایی کلی محاسبه شده و در شکل ۷ به نمایش درآمده است. براساس نتایج به دست آمده، جانیایی ۲۰-۲ با مقدار ۰/۰۶ واحد، نزدیکترین و ۱۶-۲ با مقدار ۱/۱۳ واحد، دورترین احساس گرمایی را نسبت به وضعیت خنثی داشته است. همچنین، در سرمایش شدیدتر (دمای هوای وزش ۱۶ درجه سلسیوس)، افزایش سرعت باعث احساس سرمای بیشتر می‌شود. اما با افزایش دما و با سرمایش معتدل‌تر (دمای هوای وزش ۲۰ درجه سلسیوس) افزایش سرعت باعث نزدیک‌تر شدن احساس کلی بدن به وضعیت خنثی شده است. ضمناً مشاهده می‌شود

با توجه به نمودارهای احساس گرمایی موضعی گزارش شده در شکل ۶، میزان غیریکنواختی شاخص احساس گرمایی بین اعضا (تفاوت میان بیشترین و کمترین احساس گرمایی اعضای مختلف) برای حالت ۱۶-۲ با مقدار ۴ واحد بیشترین و برای حالت ۱-۱۶ کمتر از ۲ واحد و کمترین میزان است. به بیان دیگر، چنانچه دمای ورودی کاهش یابد و سرعت وزش زیاد شود، در نتیجه میزان انتقال گرما از بدن افزایش می‌یابد و لذا غیریکنواختی بیشتری از نظر دمایی و احساس گرمایی بین اعضا ایجاد می‌شود. ضمناً نتایج نشان می‌دهد که کمترین اثر جانیایی دریچه بر احساس گرمایی موضعی اعضا در حالت ۱-۱۶ رخ داده است. در این حالت فارغ از جانیایی، احساس گرمایی همه اعضا در بازه ۱- تا



شکل ۷- احساس گرمایی کلی بدن برای حالت‌های مختلف مساله

## ۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، توزیع سرعت و دمای هوا و شاخص احساس گرمایی موضعی بخش‌های مختلف بدن تحت سیستم تهویه انفرادی در حالت سرمایش برای سه جانیایی مختلف دریچه، دو دمای هوای ورودی و ۱۶ و ۲۰ درجه سلسیوس و دو سرعت وزشی ۱ و ۲ متر بر ثانیه (در مجموع ۱۲ حالت بررسی مختلف) ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. برای سه حالت مختلف A، B و C، دریچه ورود هوا به ترتیب در ارتفاع ۰/۲۵، ۰/۸ و ۱/۴ متر از سطح زمین قرار گرفته‌اند که به ترتیب مقابل پا، شکم و صورت مانکن می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که برای همه جانیایی‌ها بیشترین اختلاف دما بین اعضا در حالت ۱۶-۲ و کمترین اختلاف در حالت ۲۰-۱ اتفاق افتاده است. اما با بررسی نمودار احساس گرمایی موضعی، بیشترین و کمترین اختلاف احساس گرمایی بین اعضا به ترتیب مربوط به حالت‌های ۱۶-۲ و ۱۶-۱ می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود لگن در همه حالت‌ها دمای بالاتری نسبت به سایر اعضا داشته و در هر چهار نمودار، دمای این عضو فارغ از اثر جانیایی دریچه بوده است. با اینکه لگن بالاترین دما را در همه حالت‌ها به خود اختصاص داده، اما گرمترین احساس گرمایی را در همه حالت‌ها نداشته است و باتوجه به تحقیقات پیشین دمای بالای لگن منجر به احساس نامطلوب و ناراضیتی ساکنان نمی‌شود. همچنین، در حالت ۲۰-۱ با اینکه دمای پا برای همه جانیایی‌ها بالاتر از دمای ساق پا گزارش شده است، اما احساس گرمایی آن خنک‌تر از احساس گرمایی ساق پا بوده است.

کمترین اثر جانیایی دریچه بر احساس گرمایی موضعی اعضا در حالت ۱۶-۱ بوده است. جانیایی مقابل پا با دما و سرعت بیشتر (حالت ۲۰-۲) با اختلاف کلی ۱/۰۷ واحد، نزدیکترین و جانیایی مقابل صورت با دمای کمتر و سرعت بیشتر (حالت ۲-۱۶) با اختلاف کلی ۳/۸۹ واحد، دورترین احساس گرمایی را نسبت به وضعیت خنثی داشته اند. همچنین در سرمایش شدیدتر (دمای وزش ۱۶ درجه سلسیوس) افزایش سرعت باعث احساس سرمای بیشتر می‌شود. اما با افزایش دما و با سرمایش معتدل‌تر (دمای وزش ۲۰ درجه سلسیوس) افزایش سرعت باعث نزدیک‌تر شدن احساس کلی بدن به وضعیت خنثی شده است.

در تمام حالت‌ها فارغ از جانیایی دریچه، دو عضو دست و سر احساس خنک‌تری نسبت به احساس گرمایی کلی بدن داشته‌اند که نشان می‌دهد در سیستم تهویه انفرادی برهنگی یک عضو تاثیر زیادی بر احساس گرمایی آن دارد.

باتوجه به نمودارهای احساس گرمایی موضعی و کلی بدن، با مقایسه احساس هر عضو با احساس گرمایی کلی بدن، مشاهده می‌شود

که احساس گرمایی کلی در حالت‌های ۱-۱۶ و ۲-۲۰ به احساس خنثی نزدیکتر است. حالت ۲-۱۶ با مقدار ۰/۵۴ تا ۱/۱۳- واحد (بین جانیایی‌های مختلف) احساس سردتر و حالت ۲۰-۱ با مقدار ۰/۵۵ تا ۰/۶۶ واحد احساس گرمتر ایجاد کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد افزایش دمای هوای ورودی (عامل موثر بر کاهش مصرف انرژی) با افزایش دبی جریان ورودی (عامل موثر بر افزایش مصرف انرژی) باعث بهبود احساس گرمایی کل بدن می‌شود. لذا پیدا کردن شرایط بهینه با توجه به شرایطی مانند محل دریچه ورود و خروج و میزان هوای برگشتی اهمیت پیدا می‌کند.

باتوجه به نمودارهای احساس گرمایی موضعی و کلی بدن، با مقایسه احساس هر عضو با احساس گرمایی کلی بدن، مشاهده می‌شود که در جانیایی‌های مقابل پا و شکم، یعنی جانیایی‌های A و B، تعداد اعضای بیشتری احساس خنک‌تر از احساس کلی بدن داشته‌اند. اما در جانیایی مقابل صورت یعنی جانیایی C، تعداد اعضای خنک‌تر کمتر بوده است که نشان می‌دهد سرمایش موضعی سر تاثیر زیادی بر احساس گرمایی کل بدن دارد و سرمایش این عضو روش مناسبی برای بهبود احساس گرمایی کل بدن در شرایط محیطی گرم است. از سوی دیگر، قرارگیری دریچه سرمایش در نزدیکی سر (حالت C)، در تمامی حالت‌ها کمترین شاخص را برای احساس کلی بدن (یعنی سردترین احساس کلی) ایجاد کرده است. به طوری که در این حالت، احساس گرمایی کلی بدن در مقایسه با جانیایی دریچه در نزدیکی پا (حالت A) حدود ۰/۶ واحد خنک‌تر گزارش شده است.

این موضوع نیز نشان می‌دهد که سر یک عضو بسیار موثر برای سرمایش در شرایط گرم است و با سرمایش این بخش در شرایط غیریکنواخت می‌توان احساس مطلوبی به دست آورد. در مقابل، نتایج تمامی حالت‌ها نشان می‌دهد احساس گرمایی کلی برای جانیایی A (سرمایش پا)، گرم‌تر از جانیایی C (سرمایش سر) است؛ که نشان می‌دهد پا عضو مناسبی برای سرمایش در شرایط غیریکنواخت نیست. نتایج فوق با نتایج تحقیق ژانگ و همکاران [۳۰] نیز همخوانی خوبی دارد. بر اساس تحقیق ایشان، افراد مورد آزمایش به طور کلی با ناحیه سر خنک احساس مطلوب‌تری داشتند. همچنین افراد بیشتر با پای گرم احساس خوشایند داشتند.

در تمام حالت‌ها فارغ از جانیایی دریچه، دو عضو دست و سر احساس خنک‌تری نسبت به احساس گرمایی کلی بدن دارند که نشان می‌دهد در سیستم تهویه انفرادی برهنگی یک عضو تاثیر زیادی بر احساس آن دارد. همچنین خنک‌ترین عضو نسبت به رای احساس گرمایی کل بدن، برای جانیایی C، سر و برای جانیایی B، دست بوده‌است. در دمای وزش ۱۶ درجه سلسیوس، با مقایسه دو سرعت وزش ۱ و ۲ متر بر ثانیه، مشاهده می‌شود که با سرعت وزش بیشتر (حالت ۲-۱۶)، احساس گرمایی کل بدن خنک‌تر است. از طرفی با بررسی نمودار احساس موضعی در این حالت مشاهده می‌شود تعداد اعضای بیشتری احساس گرم‌تر نسبت به احساس گرمایی کلی بدن دارند. به عبارت دیگر، در شرایط محیطی غیریکنواخت (مثلا سرعت وزش بیشتر)، با اینکه احساس گرمایی خنک‌تر میشود اما غیریکنواختی بین اعضا هم بیشتر میشود به طوری که تاثیر سردترین عضوها مثل سر و دست غالب شده و در مقایسه با سایر اعضا، باعث می‌شود تاثیر بیشتری بر احساس گرمایی کلی بدن داشته باشند.

- Pattern Distribution. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 19, No.12, pp. 3083-3093, 2019.
- [3] Zolfaghari A. and Teymoori S., Experimental investigation of the effects of inlet cooling air temperature on the occupants' local thermal sensation in the under-floor air distribution system. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No.3, pp. 11-11, 2021.
- [4] Zolfaghari S. A., Izadi M., Hooshmand S. M., Rateghi R., Beheshtian M. and Teymoori S., Experimental assessment of temperature distribution and draught discomfort for a personalized CJV system. In *The 28th Annual International Conference of Iranian Society of Mechanical Engineers*, Tehran, Iran, 2020.
- [5] Zhang W., Prediction and visualizing validation of downward directed vertical wall jets and air lake phenomena. MSc thesis, Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [6] Kabanshi A., Wigö H. and Sandberg M., Experimental evaluation of an intermittent air supply system-Part 1: Thermal comfort and ventilation efficiency measurements. *Building and Environment*, Vol. 95, pp. 240-250, 2016.
- [7] Wigö H., Effects of intermittent air velocity on thermal and draught perception-a field study in a school environment. *International Journal of Ventilation*, Vol. 12, No.3, pp. 249-256, 2013.
- [8] Naghani P. E., Zolfaghari S., Maerefat M., Toftum J., Hooshmand S. and Izadi M., Experimental investigation of occupants' thermal sensation under a personalized ventilation system. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2069, No.1: IOP Publishing, p. 012167, 2021.
- [9] Russo J., *A detailed and systematic investigation of personal ventilation systems*. Syracuse University, 2011.
- [10] Kogawa Y., Nobe T. and Onga A., Practical investigation of cool chair in warm offices. In *Proceedings of Clima*, Vol. 7: Citeseer 2007.
- [11] Faulkner D., Fisk W., Sullivan D. and Wyon D., Ventilation efficiencies of task/ambient conditioning systems with desk-mounted air supplies. In *Proceedings of Indoor Air'99*, 1999.
- [12] Melikov A. K., Cermak R. and Majer M., Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices. *Energy and buildings*, Vol. 34, No. 8, pp. 829-836, 2002.
- [13] Conceição E. and Awbi H., Evaluation of integral effect of thermal comfort, air quality and draught risk for desks equipped with personalized ventilation systems. *Energies*, Vol. 14, No. 11, p. 3235, 2021.
- [14] Yang B., Sekhar C. and Melikov A. K., Ceiling mounted personalized ventilation system in hot and humid climate-An energy analysis. *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 12, pp. 2304-2308, 2010.
- [15] Zhang H., Arens E., Kim D., Buchberger E., Bauman F. and Huizenga C., Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task-ambient conditioning system. *Building and Environment*, Vol. 45, No. 1, pp. 29-39, 2010.
- [16] Watanabe S., Shimomura T. and Miyazaki H., Thermal evaluation of a chair with fans as an individually controlled system. *Building and Environment*, Vol. 44, No. 7, pp. 1392-1398, 2009.
- [17] Pasut W., Zhang H., Arens E. and Zhai Y., Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair: Results from human subject tests. *Building and Environment*, Vol. 84, pp. 10-21, 2015.
- [18] Kaczmarczyk J., Melikov A., Bolashikov Z., Nikolaev L., and Fanger P. O., Human response to five designs of personalized ventilation. *Hvac&R Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 367-384, 2006.
- [19] Kong M., Zhang J. and Wang J., Air and air contaminant flows in office cubicles with and without personal ventilation: A CFD modeling and simulation

که در جانمایی‌های مقابل پا و شکم، یعنی جانمایی‌های A و B، تعداد اعضای بیشتری احساس خنک‌تر از احساس کلی بدن داشته‌اند. اما در جانمایی مقابل صورت یعنی جانمایی C، تعداد اعضای خنک‌تر کمتر بوده است که نشان می‌دهد سرمایش موضعی سر تأثیر زیادی بر احساس گرمایی کل بدن دارد و سرمایش این عضو روش مناسبی برای بهبود احساس گرمایی کل بدن در شرایط محیطی گرم است. از سوی دیگر و با توجه به تفاوت احساس گرمایی کل بدن در جانمایی‌های مختلف دریچه ورود هوا، نیز می‌توان به این نتیجه رسید که سرمایش سر یک راهکار موثر برای کاهش مصرف انرژی است. زیرا تأثیر سرمایش آن بر احساس کلی بسیار بیشتر بوده و می‌توان در دماهای بالاتری نسبت به بقیه اعضا این احساس کلی را به وجود آورد. در مقابل پا عضو مناسبی برای سرمایش در شرایط غیریکنواخت نیست. در شرایط محیطی غیریکنواخت (مثلاً سرعت وزش بیشتر)، با اینکه احساس گرمایی خنک‌تر میشود اما غیریکنواختی بین اعضا هم بیشتر میشود به‌طوری که تأثیر سردترین عضوها مثل سر و دست غالب شده و در مقایسه با سایر اعضا، باعث می‌شود تأثیر بیشتری بر احساس گرمایی کل بدن داشته باشند.

## ۸- فهرست علائم

|                     |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| $BF(i, j)$          | نرخ جریان خون                                  |
| $C(i, j)$           | ظرفیت گرمایی بخش‌های مختلف بدن                 |
| $C_{bl}$            | ظرفیت گرمایی خون                               |
| $C_p$               | ظرفیت گرمایی                                   |
| $g_i$               | شتاب گرانش                                     |
| $k$                 | رسانایی گرمایی                                 |
| $k(i, j)$           | رسانایی گرمایی بافت‌های مختلف بدن              |
| $\bar{p}$           | فشار                                           |
| $Q_{met}(i, j)$     | نرخ تولید گرما برای نقاط مختلف                 |
| $S_t$               | نرخ تولید گرما                                 |
| $T$                 | دما                                            |
| $T_{ar}(t)$         | دمای خون سرخرگی هر بخش بدن                     |
| $T_i$               | توزیع دمای بافت هر بخش از سطح پوست تا مرکز بدن |
| $T_{ref}$           | دمای خنثی                                      |
| $TSV_i$             | احساس گرمایی هر بخش بدن                        |
| $\Delta T_i$        | اختلاف دمای پوست هر بخش با دمای خنثی پوست      |
| $\Delta T_{mean}$   | اختلاف دمای متوسط پوست و دمای میانگین خنثی     |
| $\bar{u}_i$         | سرعت                                           |
| $Vol(i, j)$         | حجم نقاط مختلف بدن                             |
| <b>علائم یونانی</b> |                                                |
| $\beta$             | ضریب انبساط حجمی                               |
| $\mu$               | لزجت دینامیکی                                  |
| $\rho$              | چگالی                                          |

## ۹- مراجع

- [1] Yang B., Melikov A.K., Kabanshi A., Zhang C., Bauman F.S., Cao G., Awbi H., Wigö H., Niu J., Cheong K.W.D. and Tham K.W., A review of advanced air distribution methods-theory, practice, limitations and solutions. *Energy and Buildings*, Vol. 202, p. 109359, 2019.
- [2] Taheri M., Afzalian M., Zolfaghari S. and Hassanzadeh H., Air Inlet Angle Effects in Swirling Diffuser of UFAD Systems on Micron Particles

- study. *Building Simulation*, Vol. 8, No. 4 :Springer, pp. 381-392, 2015 .
- [20] Zhang T. T., Li P. and Wang S., A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes. *Building and Environment*, Vol. 47, pp. 89-99, 2012.
- [21] Fang Z., Liu H., Li B. and Cheng Y., Thermal comfort and skin temperature responses to the supplied air from personal air nozzles in aircraft cabins. *Indoor and Built Environment*, Vol. 27, No. 6, pp. 831-845, 2018.
- [22] Rahmati B., Heidarian A. and Jadidi A. M., Investigation in performance of a hybrid under-floor air distribution with improved desk displacement ventilation system in a small office. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, pp. 861-872, 2018.
- [23] Deymi O., Zolfaghari S. A. and Malek Jafarian M., Effect of Velocity and Direction of Airflow on Thermal Comfort and Energy Consumption: Case of New Exclusive Cooling Systems. *Iranian Journal of Energy*, Vol. 21, No. 2, pp. 75-97, 2018.
- [24] Sahebl H. A. and Al-amir Q. R., CFD Analysis for The Effect of Personal Ventilation Combined with Mixing Ventilation on Performance Index (ADPI) and Thermal Human Comfort. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 978, No. 1: IOP Publishing, p. 012033, 2020 .
- [25] Zolfaghari A., Ebrahimi Naghani P. and Maerefat M., Experimental investigation of personalized ventilation effects on temperature, velocity, and draught discomfort distribution in an office. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 7, pp. 17-17, 2021.
- [26] Fanger P. O., *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. 1970.
- [27] Gagge A. P., Fobelets A., Berglund L., A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE trans*, Vol. 92, No. 2, pp. 709-731, 1986.
- [28] Afzalian M. and Zolfaghari S. A., Development of a multi-segment model for assessing the human body thermal conditions by modifying the blood circulatory system. *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 1, pp. 295-304, 2022.
- [29] Jin Q., Li X., Duanmu L., Shu H., Sun Y. and Ding Q., Predictive model of local and overall thermal sensations for non-uniform environments. *Building and Environment*, Vol. 51, pp. 330-344, 2012.
- [30] Zhang H., Arens E., Huizenga C. and Han T., Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 389-398, 2010.