

بکارگیری سیستم‌های گرمایش انفرادی؛ راهکاری مؤثر برای دستیابی به شرایط آسایش حرارتی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی

امید دیمی^۱، سید علیرضا ذوالفقاری^{۲*}، سید مجید ملک‌جعفریان^۳

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۳۷۶، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، میزان مصرف انرژی یک سیستم گرمایش انفرادی با در نظر گرفتن قید آسایش حرارتی در یک اتاق نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته و با سیستم گرمایش غیر انفرادی مقایسه شده است. اتاق مذکور به ابعاد $4 \times 3 \times 2.7$ متر مکعب است و شامل میز، صندلی، مدلی تقریبی از بدن انسان، یک دریچه‌ی خروجی هوا و چهار دریچه ورودی هوا برای سیستم تهویه انفرادی می‌باشد. برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از حلگر عددی این‌فوم استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که شاخص احساس حرارتی میانگین افراد (PMV) در محل حضور فرد در سیستم گرمایش غیر انفرادی توزیع یکنواخت‌تری نسبت به سیستم انفرادی دارد. با این وجود، پارامتر ناراضی‌تی حرارتی موضعی ناشی از کوران برای سیستم گرمایش انفرادی در محدوده‌ی مجاز (کمتر از ۰.۲۰) قرار گرفته است. همچنین، توان مصرفی سیستم گرمایش انفرادی بسیار کمتر از سیستم گرمایش غیر انفرادی گزارش شد، به طوری که صرفه‌جویی در انرژی در حدود ۷۰ تا ۸۵ درصد حاصل گردید. در وضعیت گرمایش انفرادی، شرایط مطلوب آسایش حرارتی و مصرف انرژی کمینه از بین حالت‌های مورد بررسی در سرعت ۱ متر بر ثانیه به‌ازای دمای $34/5$ درجه سلسیوس به دست آمد.

کلیدواژگان: سیستم گرمایش انفرادی، آسایش حرارتی، احساس حرارتی، ناراضی‌تی حرارتی موضعی، مصرف انرژی

Utilizing of personalized heating systems; an effective approach for achievement of thermal comfort and energy saving

Omid Deymi, Alireza Zolfaghari*, Majid Malek-Jafarian

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

* P.O.B. 97175/376 Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

Received: 16 April 2016

Accepted: 13 November 2016

Abstract

In the present study, the energy consumption of a personalized heating system has been evaluated with considering of thermal comfort conditions in a sample room and also compared with non-personalized heating system. The mentioned room has dimensions as $4 \times 3 \times 2.7$ m³ and it includes a table, a chair, approximate model of a human body, a return air opening and four air inlet diffusers for personalized ventilation system. For solving the governing equations, OpenFOAM numerical solver has been utilized. Results indicate that non-personalized heating system can provide more uniform distribution in Predicted Mean Vote (PMV) index compared with personalized heating system. Nevertheless, the local thermal discomfort index due to draught is within the permissible range (less than 20%) for personalized heating system. Also, the energy consumption of personalized heating system has been reported much less than non-personalized heating system, therefore the energy saving of personalized system is about 70 to 85 percent. In personalized heating mode, desired conditions of thermal comfort and minimum energy consumption obtained at the velocity of 1m/s and temperature of 34.5 °C among the investigated cases.

Keywords: Personalized heating system, Thermal comfort, Thermal sensation, Local thermal discomfort, Energy consumption



۱- مقدمه

هدف تهویه مطبوع، تأمین شرایط مطلوب در یک فضای مورد نظر است. این فضا می‌تواند ساختمان مسکونی، اداری، هتل، بیمارستان، داخل وسایل نقلیه مانند هواپیما، اتومبیل، قطار و نیز فضاهای خاص مانند فضاهای تولید تراشه های الکترونیکی، دارویی و بهداشتی باشد. بر این اساس، سیستم‌های مختلف و متناسب با هر مکان طراحی و اجرا می‌شوند.

تاکنون دسته‌بندی‌های مختلفی برای سیستم‌های تهویه مطبوع ارائه شده، که تحقیق حاضر قرار است تنها بر روی «سیستم‌های تهویه انفرادی»^۱ به‌عنوان دسته‌ای از سیستم‌های همرفتی متمرکز شود. این سیستم‌ها تنها بخشی از فضا را برحسب محل قرارگیری اشخاص، تحت تأثیر قرار می‌دهند و عملکردی شبیه دریچه‌های کولر داخل خودرو دارند. پیاده‌سازی این سیستم در خودروها مدت‌هاست که انجام شده ولی در مورد ساختمان، هنوز در مرحله تحقیقاتی قرار دارد.

در یک سیستم تهویه انفرادی، افراد بر اساس شرایط آسایش حرارتی^۲ خود و احساس رضایت یا عدم رضایتی که از محیط دارند، می‌توانند سرعت و جهت وزش، دمای جریان هوا و حتی طرز قرارگیری دریچه‌های تهویه انفرادی را مطابق میل خود تنظیم نمایند تا به این صورت، وضعیت مطلوب را برای خود فراهم آورند. در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از این سیستم‌ها نشان داده شده است.

در چند سال اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه سیستم‌های تهویه انفرادی صورت گرفته است. در همین راستا، در سال ۲۰۰۶، کچمارچک و همکارانش [۱] واکنش ۳۰ نفر به پنج دستگاه پایانه‌ی هوای متفاوت برای تهویه انفرادی را که در دو سطح از دمای هوای اتاق (۲۳ °C و ۲۶ °C) کار می‌کرد، مورد مطالعه قرار دادند. این امکان برای افراد فراهم بود تا نرخ جریان هوا و موقعیت پایانه‌ی هوا را تنظیم کنند. در نتیجه، ناحیه حرارتی موضعی که با تهویه انفرادی به وجود آمد، به صورت قابل قبول ارزیابی شد. ایشان همچنین دریافتند که جریان هوای به سمت صورت در مقایسه با جریان هوای به سمت شکم مناسب‌تر است. همچنین ژانگ و همکارانش [۲] در سال ۲۰۰۸، یک سیستم تهویه هوا جهت تأمین آسایش حرارتی در محدوده وسیعی از محیط طراحی کردند، به طوری که در حالت گرمایش بر پاهای دست‌ها، و در حالت سرمایش بر دست‌ها و صورت اثر می‌کرد. توان مصرفی بیشینه‌ی این سیستم تهویه، در سرمایش ۴۰ وات و در گرمایش ۶۰ وات بود. آنها این سیستم را در محدوده دماهای بین ۳۰-۱۸ °C روی افراد آزمایش کردند. نتایج نشان داد که این سیستم قادر است کیفیت هوای حس شده را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد. ایشان همچنین از طریق شبیه‌سازی نشان دادند که این سیستم، پتانسیل بالایی در صرفه‌جویی انرژی در شرایط آب و هوایی گرم و خشک دارد.

یانگ و همکارانش [۳] در سال ۲۰۱۰، به تحلیل انرژی سیستم تهویه انفرادی سقف‌آویز در مناطق گرم و مرطوب پرداختند. ایشان برای این منظور، از تعدادی پایانه تخلیه هوای انفرادی با نرخ‌های جریان هوای تزریقی مختلف استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از تهویه انفرادی سقف‌آویز ترکیب‌شده با تهویه اختلاطی^۳، مصرف انرژی را نسبت به تهویه اختلاطی کاهش خواهد داد. همچنین زمانی که ترکیب سیستم تهویه انفرادی سقف‌آویز و سیستم تهویه اختلاطی استفاده می‌شود، افزایش دمای اتاق می‌تواند انرژی لازم جهت سرمایش را ذخیره کند. تحقیق دیگری توسط لِن و همکارانش [۴] در سال ۲۰۱۳ جهت ارزیابی کاربرد تهویه انفرادی کنار بستر^۴ بر روی افراد در حال خواب مورد آزمایش قرار گرفت. این آزمایش به این منظور انجام شد که آیا به‌کارگیری تهویه انفرادی بر این افراد، پیامد منفی دارد یا خیر؟ ۳۶ نفر در اتاق خواب‌هایی برای یک شب کامل در فصل زمستان خوابیدند، در حالی که پارامترهای فیزیولوژیکی و حرکت بدنشان پیوسته اندازه‌گیری می‌شد. این اتاق‌ها از نظر حرارتی خنثی بوده و بعضی دارای تهویه انفرادی و برخی بدون آن بودند. سیستم تهویه انفرادی کنار بستر، هوای تازه را برای منطقه تنفسی افراد در حال خواب، تأمین می‌کرد. نتایج نشان داد که هنگام خواب، حتی اگر دمای هوای تزریقی تهویه انفرادی (در حدود ۲۴ °C) اندکی بالاتر از دمای محیط (در حدود ۲۳ °C) هم باشد، احساس حرارتی افراد به طور محسوسی به سمت احساس خنک سوق پیدا می‌کند و دمای سطح پوست افراد کاهش می‌یابد. چوچینزکا و بوگدان [۵] در سال ۲۰۱۵، اثر دما و جهت جریان هوای تهویه انفرادی روی احساس و آسایش حرارتی افراد ساکن در فضاهای اداری را بررسی کردند. آزمایش‌هایی با شرکت ۲۰ داوطلب و در دو جهت جریان هوا (در سطح صورت و مچ پا) انجام شد. شرایط شبیه‌سازی مربوط به دماهای تابستان و زمستان بود. نتایج نشان داد که در شرایط تابستانی، در سرعت هوای انفرادی ۰/۳۵-۰/۳۰ m/s اطراف صورت و قفسه سینه داوطلبان، دمای جریان هوای تزریقی نسبت به جهتش اثر کمتری دارد. در شرایط زمستانی نیز جهت جریان هوای تزریقی تأثیر خاصی بر احساس و آسایش حرارتی افراد نداشت. همچنین ثابت شد که افزایش دمای محیط در شرایط تابستانی، تنها در حدود ۲۸-۲۷ °C ممکن بود و فراتر از این مقادیر، تهویه انفرادی هیچ امکانی برای تعادل عوامل محیطی نداشت. نشان داده شد که تنظیم دمای هوای محیط در ۲۰ °C و ۲۲ °C و هدایت آن به سمت مچ پا، برای سطح صورت مناسب‌تر است. به‌علاوه، درصد افرادی که آسایش حرارتی را اعلام می‌کردند، در اکثر اندازه‌گیری‌های جریان هوا روی صورت، نسبت به سایر قسمت‌های بدن، کمتر بود. این پدیده را همان احساس ناراضی ناشی از کوران^۵ در نظر می‌گیرند.

۲- فضای نمونه و روش تحقیق

در این تحقیق، یک اتاق مطابق شکل ۲ با ابعاد ۴×۳×۲/۷ متر مکعب، شامل یک دریچه خروجی هوا با ابعاد ۶۰×۲۰ سانتی‌متر مربع روی سقف اتاق، ورودی‌های تهویه انفرادی، میز، صندلی و مدلی تقریبی از یک انسان نشسته بر روی صندلی در پشت میز و جلوی سیستم تهویه انفرادی به‌عنوان فضای نمونه در نظر گرفته شده است.



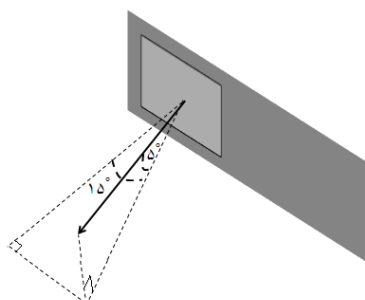
شکل ۱ شماتیکی از یک سیستم تهویه انفرادی

3. Mixing Ventilation
4. Bedside Personalized Ventilation

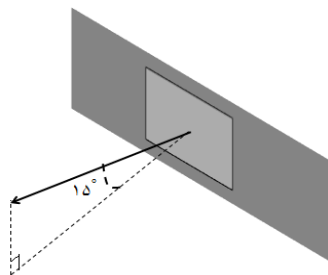
۵. سرمایش موضعی همرفتی به دلیل وزش، در بخش‌هایی از بدن که لخت است و یا پوشش کمتری دارد. (Draught)

1. Personalized Ventilation Systems
2. Thermal Comfort

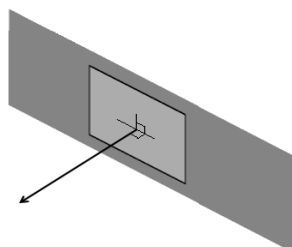




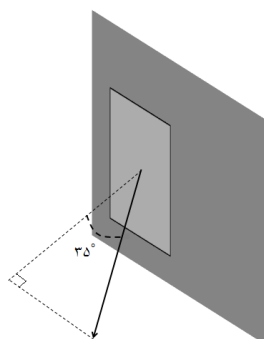
(الف) وضعیت وزش هوا از دریچه‌های بالا برای هر دو حالت H1 و H2



(ب) وضعیت وزش هوا از دریچه‌ی وسط برای حالت H1



(ج) وضعیت وزش هوا از دریچه‌ی پایین برای حالت H1



(د) وضعیت وزش هوا از دریچه‌های پایین برای حالت H2

شکل ۴ حالت‌های مختلف وزش هوا در وضعیت گرمایش

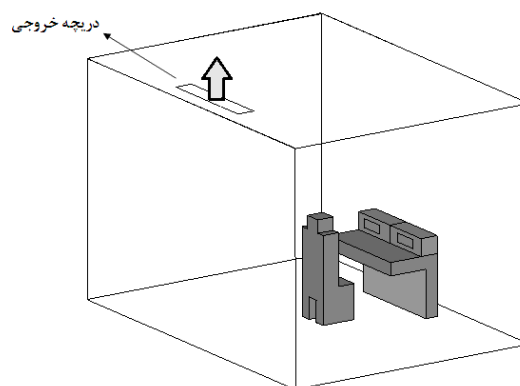
سیستم غیر انفرادی نشان داده شده در شکل ۵ جهت مقایسه با سیستم گرمایش انفرادی مذکور در نظر گرفته شده است. مطابق این شکل، در گرمایش غیر انفرادی تنها دریچه‌های ورودی و خروجی فعال بوده و سیستم انفرادی غیر فعال است. برای سیستم غیر انفرادی، ابعاد دریچه ورودی 90×30 سانتی‌متر مربع و ابعاد دریچه خروجی 120×30 سانتی‌متر مربع می‌باشد. در این سیستم، سرعت و دمای هوای ورودی به ترتیب $4/5$ متر بر ثانیه و 35 درجه سلسیوس لحاظ شده است.

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم، از حلگر عددی اپن‌فوم^۱ و بسته‌ی حل «بویانت بوزینسک سیمپل فوم»^۲ (مرتبط با حل پایای جریان جابجایی آزاد تراکم‌ناپذیر مغشوش) استفاده شده است. حلگر مذکور از روش عددی حجم محدود بهره می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی و حل مسأله با بررسی‌های مختلف، حالت‌های مناسب برای شرایط مرزی، هندسی و جریانی در نظر گرفته شده است.

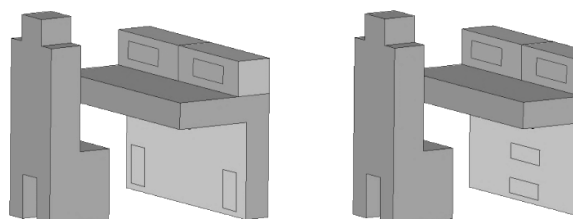
مطابق شکل ۳، در وضعیت گرمایش انفرادی، علاوه بر دو دریچه روی میز (با ابعاد 30×10 سانتی‌متر مربع)، از دو دریچه در زیر میز نیز استفاده شد. در این شکل، دو موقعیت مناسب‌تر نسبت به موقعیت‌های گوناگون مورد بررسی، نمایش داده شده است. شکل ۳-الف) دو دریچه‌ی افقی تعبیه‌شده در وسط قسمت تحتانی میز به ابعاد 20×10 سانتی‌متر مربع و شکل ۳-ب) نیز دو دریچه قائم در سمت چپ و راست زیر میز به ابعاد 30×10 سانتی‌متر مربع را نشان می‌دهد.

برخلاف سرمایش انفرادی، در گرمایش انفرادی هوای وزیده شده به سمت فرد در محل حضور فرد تجمع نکرده و به سرعت به سمت بالا صعود می‌کند. به همین دلیل، وجود دریچه‌ها در قسمت زیر میز ضروری می‌باشد. همان‌طور که در مرجع [۶] نیز مشاهده می‌شود، در وضعیت سرمایش نیازی به استفاده از دریچه‌های زیر میز احساس نشده است.

پس از بررسی‌های عددی فراوان به کمک حلگر اپن‌فوم و با توجه به حداقل مقدار شاخص PMV در نزدیکی فرد (یعنی $-0/5$)، جهت وزش هوا از دریچه‌های تهویه انفرادی طبق حالت‌های نشان داده شده در شکل ۴ انتخاب گردید.



شکل ۲ نمای کلی از فضای نمونه (برای سیستم گرمایش انفرادی)



(ب) حالت دوم گرمایش (H2)

(الف) حالت اول گرمایش (H1)

شکل ۳ موقعیت دریچه‌های سیستم گرمایش انفرادی روی میز

1. OpenFOAM
2. buoyantBoussinesqSimpleFoam



شرایط آسایش حرارتی را به صورت $-0.5 \leq PMV \leq +0.5$ معرفی نموده است [۱۰].

شاخص دیگر، «درصد ناراضیاتی پیش‌بینی‌شده (PPD)» نامیده شد که یک شاخص مستقل نبوده و مقدار آن از روی PMV قابل محاسبه است. یکی از عوامل ناراضیاتی حرارتی، احساس سرمای موضعی به علت جریان هوا می‌باشد، که به این پدیده نامطلوب، اصطلاحاً «کوران» گفته می‌شود. درصد افرادی که در یک محیط از رخداد کوران ابراز ناراضیاتی می‌کنند، از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید [۸]:

$$DR = (34 - T_a)(v_a - 0.05)^{0.62}(0.37v_a I_{tu} + 3.14) \quad (5)$$

که DR درصد ناراضیاتی افراد ناشی از پدیده کوران، v_a سرعت جریان هوا برحسب m/s و I_{tu} شدت اغتشاشات جریان وزشی می‌باشد. بر اساس استاندارد آشری ۵۵، مقدار شاخص DR نباید بیشتر از ۲۰٪ باشد [۱۱].

میزان توان مصرفی برای سیستم‌های تهویه با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P = \rho C_p Q \Delta T \quad (6)$$

که در این رابطه، ρ چگالی هوا، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا، Q دبی حجمی و ΔT اختلاف دمای هوای دریچه ورودی و خروجی است. همچنین، درصد صرفه‌جویی در انرژی با مقایسه توان مصرفی سیستم تهویه انفرادی و غیر انفرادی به کمک رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ES = \frac{\text{اختلاف توان مصرفی سیستم انفرادی و غیر انفرادی}}{\text{توان مصرفی سیستم غیر انفرادی}} \times 100 \quad (7)$$

۴- نتایج تحقیق

در این بخش عملکرد سیستم گرمایش انفرادی در شرایطی مورد بررسی قرار گرفته که دمای هوای ورودی بر مبنای قید آسایش حرارتی تنظیم شده است. به بیان دیگر، معیار تنظیم دمای هوای ورودی به گونه‌ای است که در وضعیت گرمایش، کمینه‌ی شاخص PMV در محل حضور فرد برابر با -0.5 قرار گرفته است. طی این بررسی، عملکرد سیستم گرمایش انفرادی برای حالت‌های مختلفی از نظر شرایط آسایش حرارتی، ناراضیاتی موضعی ناشی از کوران و مصرف انرژی مورد تحلیل قرار گرفته است.

۴-۱- بررسی PMV و ناراضیاتی حرارتی موضعی

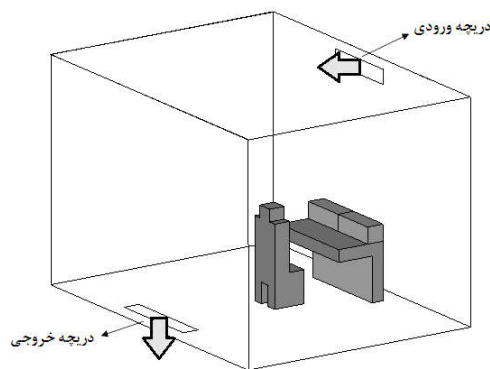
۴-۱-۱- سیستم گرمایش انفرادی

الف: نتایج حالت اول (H1)

مطابق شکل‌های ۳-الف) و ۴-الف، ب، ج)، در حالت اول گرمایش، دو دریچه در بالا و دو دریچه در پایین جانمایی شده است. هوا از دریچه‌های بالا به قسمت میانی بدن فرد وزیده شده و در دریچه‌های پایین جهت وزش هوا مستقیماً به سمت فرد می‌باشد.

در این حالت، طی بررسی‌های به عمل آمده به منظور برقراری شرایط آسایش حرارتی، سه سرعت ۱، $1/5$ و ۲ متر بر ثانیه به ترتیب به ازای دمای $34/5$ ، $35/8$ و $35/6$ درجه سلسیوس انتخاب شد و سپس اطلاعات مورد نیاز استخراج گردید.

در شکل ۶، نمودار PMV برحسب ارتفاع در محل حضور فرد نشسته (بین ۰ تا $1/15$ متر) برای سیستم گرمایش انفرادی-حالت اول، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها برای سرعت ۱ متر بر ثانیه شرایط مطلوب آسایش حرارتی ($-0.5 \leq PMV \leq +0.5$) برقرار شده است.



شکل ۵ نمایشی از سیستم گرمایش غیر انفرادی

۳- معادلات حاکم

از آنجایی که جریان در مسأله‌ی موردنظر ما آشفته است، معادلات حاکم بر جریان به صورت زیر می‌باشد:

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

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu_e \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i^2} + \rho g_i [1 - \beta(\bar{T} - T_{ref})] \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \Gamma_e \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_i \partial x_i} \right) + S_t \quad (3)$$

برای مدل‌سازی جریان آشفته نیز از مدل $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده است. این مدل تاکنون بارها برای تحلیل جریان هوای داخل اتاق مورد استفاده قرار گرفته و نتایج خوبی را به دست داده است [۷].

برای پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن به شرایط محیطی نیز مدل آسایش حرارتی فنگر^۱ مورد استفاده قرار گرفته است. فنگر برای بیان احساس حرارتی افراد دو شاخص تعریف کرد. اولین شاخص، موسوم به «میانگین آراء افراد (PMV)» است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] - f_{cl} h_c(T_{cl} - T_a)\} \quad (4)$$

که M نرخ متابولیک یا تولید حرارت در بدن برحسب W/m^2 ، W نرخ حرارت ناشی از کار مکانیکی برحسب W/m^2 ، T_{cl} دمای سطح لباس برحسب $^{\circ}C$ ، T_a دمای هوا برحسب $^{\circ}C$ ، T_{mrt} دمای میانگین تابش برحسب $^{\circ}C$ ، p_a فشار جزئی بخار آب موجود در هوا برحسب kPa ، h_c ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برحسب W/m^2 و f_{cl} فاکتور لباس می‌باشد.

محاسبه PMV یک مقدار کمی به احساس گرمایی عمومی افراد نسبت می‌دهد که با تعیین آن می‌توان نسبت به تحلیل شرایط حرارتی و بهبود و بهینه‌سازی آن اقدام نمود [۹]. استاندارد ایزو ۷۷۳۰، محدوده‌ی مجاز برای

3. Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)
4. Energy Saving (ES)

1. Fanger
2. Predicted Mean Vote (PMV)



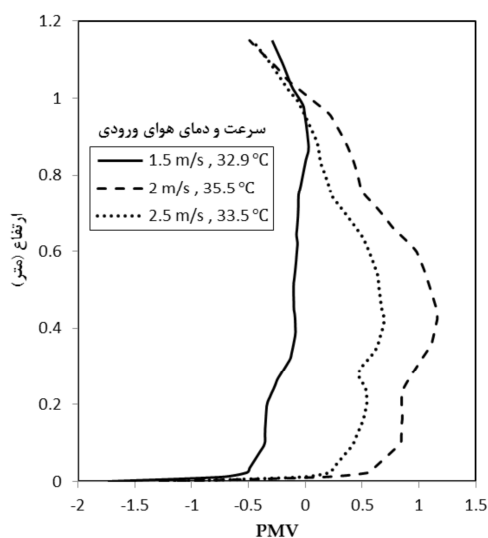
در شکل ۸، نمودار PMV برحسب ارتفاع در محل حضور فرد نشسته (بین ۰ تا ۱/۱۵ متر) برای سیستم گرمایش انفرادی-حالت دوم، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها برای سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه شرایط مطلوب آسایش حرارتی ($-0.5 \leq PMV \leq +0.5$) برقرار شده است.

شکل ۹، نمودار شاخص ناراضیاتی حرارتی موضعی ناشی از کوران بر حسب ارتفاع را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در تمامی سرعت‌ها پارامتر ناراضیاتی حرارتی موضعی در محدوده‌ی مجاز (کمتر از ۲۰٪) قرار گرفته است. مقدار این پارامتر در قسمت سر و پای فرد با توجه به بالا بودن سرعت هوا بیشترین مقدار خود را دارد.

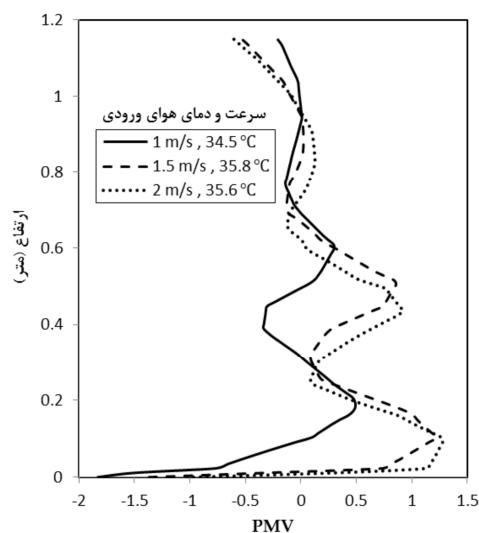
شکل ۷، نمودار شاخص ناراضیاتی حرارتی موضعی کوران برحسب ارتفاع را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در تمامی سرعت‌ها ناراضیاتی حرارتی موضعی در محدوده مجاز (کمتر از ۲۰٪) قرار گرفته است. مقدار این پارامتر در قسمت میانی بدن با توجه به پایین بودن دما بیشترین مقدار خود را دارد.

ب: نتایج حالت دوم (H2)

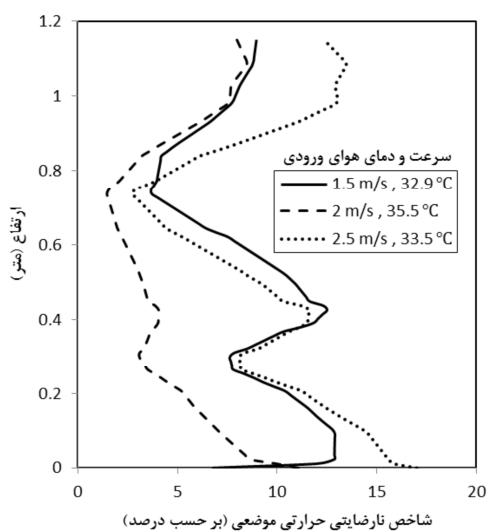
مطابق شکل‌های ۳-ب) و ۴-الف، د)، در حالت دوم گرمایش نیز دو درجه بالا و دو درجه در پایین جانمایی شده است. اندازه درجه‌های بالا و پایین با هم برابر است. هوا از درجه‌های بالا به قسمت میانی بدن فرد وزیده شده و در درجه‌های پایین جهت وزش هوا مستقیماً به سمت پای فرد می‌باشد. در این حالت، طی بررسی‌های به عمل آمده به منظور برقراری شرایط آسایش حرارتی، سه سرعت ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر بر ثانیه به ترتیب به ازای دمایی ۳۲/۹، ۳۵/۵ و ۳۳/۵ درجه سلسیوس انتخاب شد و سپس اطلاعات مورد نیاز استخراج گردید.



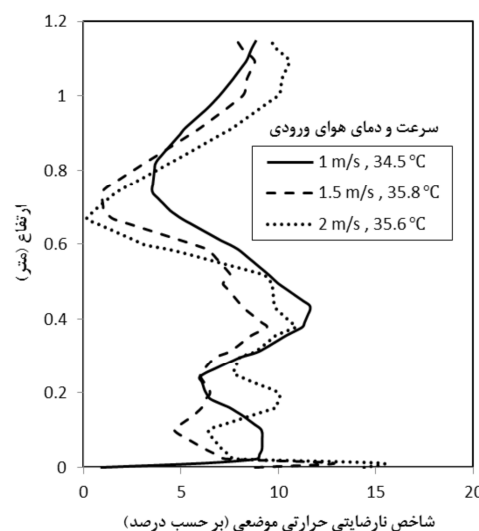
شکل ۸ توزیع PMV در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای حالت H2



شکل ۶ توزیع PMV در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای حالت H1



شکل ۹ توزیع ناراضیاتی حرارتی موضعی ناشی از کوران در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای حالت H2



شکل ۷ توزیع ناراضیاتی حرارتی موضعی ناشی از کوران در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای حالت H1



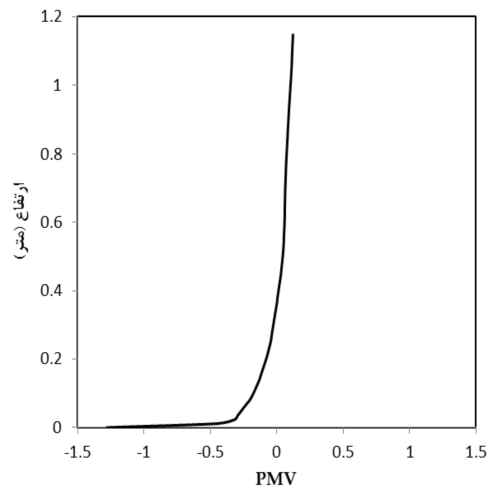
۴-۲- سیستم گرمایش غیر انفرادی

در این بخش عملکرد یک سیستم گرمایش غیر انفرادی که در شکل ۵ نشان داده شده، از حیث شرایط آسایش حرارتی و ناراضایتی حرارتی موضعی ناشی از کوران مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این سیستم، سرعت و دمای هوای ورودی به ترتیب ۴/۵ متر بر ثانیه و ۳۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. دمای هوای ورودی به‌گونه‌ای تنظیم شده که شرایط آسایش حرارتی برقرار باشد. نمودار PMV در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای سیستم گرمایش غیر انفرادی، در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق این شکل، در وضعیت استفاده از سیستم گرمایش غیر انفرادی، توزیع PMV نسبتاً یکنواخت است.

۴-۲- بررسی مصرف انرژی

جدول ۱ میزان توان مصرفی برای حالت اول و دوم سیستم گرمایش انفرادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حالت دوم توان مصرفی کمتری در سرعت‌های مشابه نسبت به حالت اول داشته است. در هر حالت توان مصرفی با افزایش سرعت، افزایش پیدا کرده است. بهترین وضعیت به لحاظ شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی در حالت اول و سرعت ۱ متر بر ثانیه فراهم شده است.

میزان توان مصرفی برای سیستم گرمایش غیر انفرادی، ۸/۷ کیلو وات محاسبه شد. در نتیجه، درصد صرفه‌جویی در انرژی با مقایسه توان مصرفی سیستم تهویه انفرادی و غیر انفرادی در هر دو حالت گرمایش بدست آمد که مقادیر آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۰ توزیع PMV در محل حضور فرد برحسب ارتفاع برای سیستم گرمایش غیر انفرادی

جدول ۱ توان مصرفی سیستم گرمایش انفرادی

سرعت (m/s)	دمای ورودی (°C)	توان مصرفی (kW)	شرایط مطلوب آسایش حرارتی را دارد؟	
۱	۳۴/۵	۱/۳	بله	حالت اول (H1)
۱/۵	۳۵/۸	۱/۷	خیر	
۲	۳۵/۶	۲/۳	خیر	
۱/۵	۳۲/۹	۱/۵	بله	حالت دوم (H2)
۲	۳۵/۵	۲/۲	خیر	
۲/۵	۳۳/۵	۲/۶	خیر	

جدول ۲ میزان درصد صرفه‌جویی در انرژی در وضعیت گرمایش

سرعت (m/s)	دمای ورودی (°C)	درصد صرفه‌جویی در انرژی	
۱	۳۴/۵	۸۵	حالت اول (H1)
۱/۵	۳۵/۸	۸۰	
۲	۳۵/۶	۷۴	
۱/۵	۳۲/۹	۸۳	حالت دوم (H2)
۲	۳۵/۵	۷۵	
۲/۵	۳۳/۵	۷۱	

طبق جدول ۲، بیشترین میزان درصد صرفه‌جویی در انرژی برای سرعت ۱ متر بر ثانیه و دمای ۳۴/۵ درجه سلسیوس و کمترین آن در سرعت ۲/۵ متر بر ثانیه و دمای ۳۳/۵ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در سرعت‌های مشابه، با کاهش دما میزان صرفه‌جویی در انرژی افزایش می‌یابد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی انجام شده در مورد ارزیابی عملکرد سیستم گرمایش انفرادی با تحلیل همزمان آسایش حرارتی و مصرف انرژی را می‌توان به صورت زیر گزارش نمود:

- با بررسی نمودارهای PMV برحسب ارتفاع در محل حضور فرد، مشاهده می‌شود که در وضعیت گرمایش انفرادی برای سرعت‌های ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه به ترتیب به ازای دماهای ۳۴/۵ و ۳۲/۹ درجه سلسیوس، شرایط مطلوب آسایش حرارتی ($-0.5 \leq PMV \leq +0.5$) به صورت کامل برقرار شده است.
- در وضعیت استفاده از سیستم گرمایش انفرادی، دامنه‌ی تغییرات PMV در محل حضور فرد بسیار بیشتر از وضعیت گرمایش غیر انفرادی می‌باشد. این به دلیل آن است که به طور کلی سرعت و دما در سرتاسر اتاق در وضعیت استفاده از سیستم غیر انفرادی توزیع یکنواخت‌تری دارد.
- با بررسی‌های انجام‌شده پیرامون سیستم گرمایش انفرادی مورد نظر مشاهده می‌شود که در سرعت‌های پایین نظیر ۱/۵-۱ متر بر ثانیه هوای گرم وزیده‌شده از دریچه‌ها فرصت می‌یابد تا در محل نزدیک فرد به سمت بالا صعود کرده و توزیع یکنواخت و مناسبی از دما را ایجاد نماید. اما هوا در سرعت‌های بالا از ناحیه حضور فرد به سمت نواحی دورتر اتاق پراکنده شده و صعود هوای گرم در پشت سر فرد صورت می‌گیرد. به همین دلیل، تفاوت زیادی میان احساس حرارتی در نواحی مقابل دریچه‌ها خصوصاً دریچه پایین و نواحی دیگر وجود دارد. همین قضیه موجب شده که سیستم گرمایش انفرادی نتواند شرایط مطلوب آسایش حرارتی را در سرعت‌های بالا فراهم نماید.

- نمودارهای شاخص ناراضایتی حرارتی موضعی برحسب ارتفاع نیز نشان می‌دهند که در هر دو حالت گرمایش انفرادی، این شاخص در سرعت‌ها و دماهای مورد بررسی، در محدوده‌ی مجاز (کمتر از ۰.۲) قرار گرفته است.
- در میان حالت‌هایی که در آن‌ها شرایط آسایش حرارتی کاملاً مطلوب است، پایین‌ترین توان مصرفی و یا بیشترین درصد صرفه‌جویی در انرژی، برای سیستم گرمایش انفرادی در سرعت ۱ متر بر ثانیه به‌ازای دمای ۳۴/۵ درجه سلسیوس گزارش شد.



۷- مراجع

- [1] J. Kaczmarczyk, A. K. Melikov, Z. Bolashikov, L. Nikolaev, P. O. Fanger, Human response to five designs of personalized ventilation, *HVAC&R Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 367-384, 2006.
- [2] H. Zhang, D. E. Kim, E. Arens, E. Buchberger, F. Bauman, C. Huizenga, *Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task-ambient conditioning system*, Center for the Built Environment (CBE), University of California, Berkeley, pp. 1-45, 2008.
- [3] B. Yang, C. Sekhar, A. K. Melikov, Ceiling mounted personalized ventilation system in hot and humid climate-An energy analysis, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 12, pp. 2304-2308, 2010.
- [4] L. Lan, Z. Lian, X. Zhou, C. Sun, H. Huang, Y. Lin, J. Zhao, Pilot study on the application of bedside personalized ventilation to sleeping people, *Building and Environment*, Vol. 67, pp. 160-166, 2013.
- [5] M. Chludzińska, A. Bogdan, The effect of temperature and direction of airflow from the personalised ventilation on occupants' thermal sensations in office areas, *Building and Environment*, Vol. 85, pp. 277-286, 2015.
- [6] ا. دیمی، س. ع. ذوالفقاری، س. م. ملک‌جعفریان، ع. فؤادالدینی، س. س. موسوی‌نسب، بررسی سیستم‌های سرمایش انفرادی و غیر انفرادی از نقطه‌نظر مصرف انرژی با اعمال قید آسایش حرارتی، دومین کنفرانس بین‌المللی و سومین همایش ملی کاربرد فناوری‌های نوین در علوم مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، اسفند ماه ۱۳۹۴.
- [7] م. صنیعی‌نژاد، مبانی جریان‌های آشفته و مدل‌سازی آن‌ها، انتشارات دانش‌نگار، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۸.
- [8] H. B. Awbi, *Ventilation of Buildings*, Second Edition, London: Spon Press, 2005.
- [9] م. معرفت، و ا. امیدوار، آسایش حرارتی (رهیافتی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان)، انتشارات کلید آموزش، تهران، چاپ اول، ۱۳۸۷.
- [10] ISO7730, Moderate Thermal Environments: Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, *International Standards Organization*, 1994.
- [11] ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2013, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta, 2013.

• میزان مصرف انرژی سیستم گرمایش انفرادی بسیار کمتر از سیستم گرمایش غیر انفرادی است. به این دلیل که استقرار درجه‌های سیستم انفرادی در محل حضور فرد، همین ناحیه را تحت تأثیر جریان وزشی قرار می‌دهد، در حالی که در سیستم غیر انفرادی تمام فضای اتاق متأثر از جریان هوای ورودی است.

• با استفاده از سیستم گرمایش انفرادی، می‌توان به میزان قابل توجهی و در حدود ۷۰ تا ۸۵ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد.

۶- فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{kJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$)
DR	نارضایتی افراد ناشی از پدیده کوران (%)
f_{cl}	فاکتور لباس (بی‌بعد)
g	شتاب جاذبه زمین (ms^{-1})
h_c	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$)
I_{cl}	مقاومت حرارتی لباس (clo)
I_u	شدت اغتشاشات جریان (بی‌بعد)
M	نرخ متابولیک (Wm^{-2})
p	فشار هیدروستاتیک (Pa)
p_a	فشار جزئی بخار آب موجود در هوا (kPa)
P	توان مصرفی (kW)
PMV	میانگین احساس حرارتی افراد (بی‌بعد)
Q	دبی حجمی (m^3s^{-1})
S	نرخ تولید انرژی حرارتی (Wm^{-3})
t	زمان (s)
T	دما (K)
T_a	دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)
T_{mrt}	دمای میانگین تابش ($^{\circ}\text{C}$)
u	مؤلفه سرعت (ms^{-1})
v_a	سرعت جریان هوا (ms^{-1})
W	نرخ حرارت ناشی از کار مکانیکی (Wm^{-2})

علائم یونانی

β	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
Γ	ضریب پخش (m^2s^{-1})
μ	لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})
ρ	چگالی (kgm^{-3})

بالانویس‌ها

() مقادیر متوسط

زیرنویس‌ها

a	مربوط به هوا
cl	مربوط به لباس
e	مؤثر
i	جهت مختصات
j	جهت مختصات
ref	مرجع
t	اغتشاشی

