



تحلیل عملکرد یک سیستم گرمایش متمرکز به منظور تامین شرایط آسایش حرارتی در هنگام خواب

سیدعلیرضا ذوالفقاری¹، حامد بیازی^{2*}، مهتاب امین زاده³، علی فوادالدینی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران

3- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* مشهد، صندوق پستی 97198-34346، m_aminzadeh@birjand.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر، تاثیرات دبی و دمای هوای ورودی بر عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع متمرکز مخصوص خواب جهت گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک سیستم تهویه مطبوع متمرکز مخصوص حالت خواب، شامل یک تخت و دو دریچه ورود و خروج هوا به ترتیب در بالای سر فرد و زیر تخت در نظر گرفته شده و برای شرایط مذکور، معادلات مربوط به جریان، انرژی و آسایش حرارتی به کمک حلگر این فوم به صورت عددی حل شده است. همچنین در تحقیق حاضر، شرایط آسایش حرارتی، نارضایتی حرارتی موضعی و ضریب بهره‌وری انرژی برای سیستم تهویه متمرکز در هنگام خواب مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سیستم مذکور به طور چشمگیری به دبی و دمای هوای ورودی وابسته است. به طوری که دبی کم برای جریان ورودی می‌تواند موجب توزیع ناهمگن دما و سرعت شده و در نتیجه وضعیت نامناسبی را به لحاظ آسایش حرارتی ایجاد می‌کند. همچنین، جهت بهره‌مندی از مزایای سیستم تهویه متمرکز بایستی از به کار بردن دبی‌های بسیار بالا نیز پرهیز شود؛ چرا که در دبی‌ها بالا، محدوده وسیعی از اتاق به جای ناحیه خواب فرد تحت تاثیر سیستم تهویه قرار می‌گیرد. همچنین نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی ضریب بهره‌وری انرژی افزایش می‌یابد که این امر نشان دهنده مزیت بالا بکارگیری سیستم‌های تهویه مطبوع متمرکز به لحاظ مصرف انرژی در دبی‌های بالا می‌باشد.

کلید واژگان: سیستم تهویه مطبوع متمرکز، آسایش حرارتی، شرایط خواب، ضریب بهره‌وری انرژی

Performance analysis of a task/ambient heating system for providing the thermal comfort conditions during sleep

Alireza Zolfaghari*, Hamed Bayazi, Mahtab Aminzadeh, Ali Foadaddini

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

* P.O.B. 97198-34346 Mashhad, Iran, m_aminzadeh@birjand.ac.ir

ABSTRACT

In this research, the effects of flow rate and temperature of supply air on the performance of a bed-based task/ambient air conditioning system (TAC) for heating have been investigated. A bed-based task/ambient air conditioning system including a bed, a supply air inlet on the top of the occupant's head and a return air outlet under the bed have been considered and for this system, the equations of flow, energy and thermal comfort have been solved by OpenFoam numerical solver. Furthermore, the thermal comfort conditions, local thermal discomfort and energy utilization coefficient have been evaluated in the present study. The results show that the performance of the mentioned system significantly depends on the supply air temperature and flow rate. So that, the low flow rates of supply air may cause non-uniform temperature and velocity distributions and this leads to unpleasant thermal comfort conditions. Also, in order to achieve the benefits of TAC systems, using of high supply air flow rates must be avoided, since high flow rates affect a wide area of the room instead of the bed zone. The results also indicate that the energy utilization coefficient increases with supply air flow rate increment that it shows the high advantage of using TAC systems for energy consumption in high supply air flow rates.

Keywords: Task/ambient air conditioning system, thermal comfort, sleep conditions, energy utilization coefficient

1- مقدمه

خواب توجه شده است. این در حالی است که در هنگام خواب با توجه به ثابت و محدود بودن موقعیت خوابیدن افراد، به نظر می‌رسد که بتوان از سیستم‌های تهویه متمرکز برای بهبود شرایط آسایش حرارتی افراد استفاده کرد. در سال 2012، پان و همکاران [1] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی عملکرد یک سیستم متمرکز برای حالت خواب پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که این سیستم می‌تواند موجب کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی شود. پس از آن، مائو و همکاران [2-4] در تحقیقاتی گسترده، به تحلیل آزمایشگاهی و عددی میزان تاثیر جانمایی دریچه‌های ورودی و

تأمین آسایش حرارتی افراد در هنگام خواب جهت افزایش کیفیت خواب از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد. برای این منظور استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع مناسب برای محیط خواب با هدف کاهش مصرف انرژی و داشتن شرایط آسایش حرارتی توصیه می‌شود. سیستم‌های تهویه مطبوع متمرکز به دلیل عملکرد مطلوبی که در کنترل دمای محلی و کاهش مصرف انرژی دارد می‌تواند انتخاب مناسبی برای استفاده هنگام خواب باشد.

کاربردهای سیستم‌های تهویه مطبوع متمرکز عمدتاً در محیط‌هایی مانند محیط کار، خرید و ... می‌باشد و کمتر به کاربرد این سیستم‌ها برای محیط

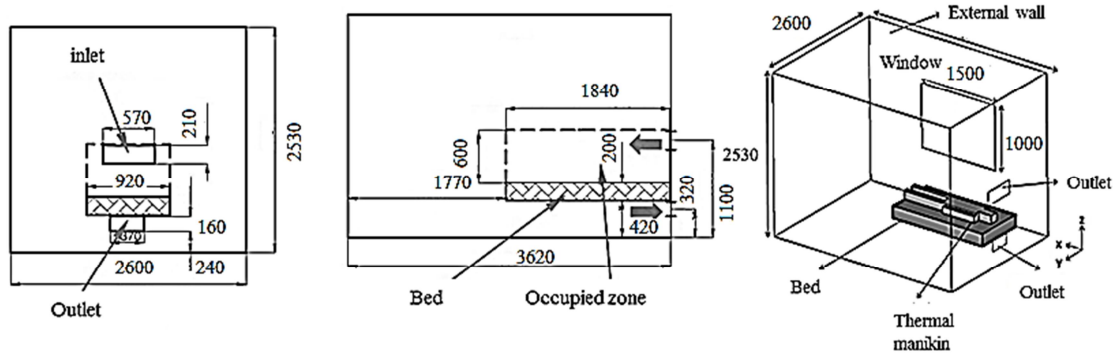


Fig. 1 Schematic of case room

شکل 1 طرحواره فضای نمونه

معادله پیوستگی:

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

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha_{eff} \nabla^2 T + S_T \quad (3)$$

β ضریب انبساط حجمی و \vec{g} بردار شتاب گرانش زمین است. همچنین، μ_{eff} ضریب لزجت مؤثر سیال است. لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ استاندارد محاسبه می‌گردد.

برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم در تحقیق حاضر، از حلگر عددی این فوم⁴ و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل فوم⁵ استفاده شده است. حلگر مذکور برای حل عددی از روش حجم محدود⁶ بهره می‌گیرد. همچنین برای حل مسأله یک شبکه‌بندی غیر سازمان یافته ایجاد شده است و در طی حل عددی، استقلال حل از شبکه محاسباتی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و شبکه‌ای با حدود 400 هزار گره محاسباتی مناسب تشخیص داده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد سیستم تهویه متمرکز بر شرایط آسایش حرارتی در هنگام خواب، جریان هوا با دبی و دمای مختلف از دریچه ورودی تعبیه شده در بالای سر فرد به فضای اتاق وارد می‌شود و شرایط حرارتی حاکم بر اطراف فرد را متأثر می‌کند. نرخ جریان هوای ورودی 80، 60 و 100 لیتر بر ثانیه و دمای آن در هر حالت بر مبنای شرایط آسایش حرارتی تعیین می‌شود. همچنین، شرط مرزی برای بدن انسان شار ثابت در نظر گرفته شده است و مقدار آن بر اساس نرخ متابولیک افراد در هنگام خواب برابر با 45 وات بر متر مربع سطح بدن لحاظ شده است. ضمن این‌که میزان اتلاف حرارتی از دیوارهای خارجی و پنجره به ترتیب 18 و 20 وات بر متر مربع می‌باشد و سطح تخت، کف اتاق و سایر دیوارها، عایق در نظر گرفته شده است.

2-3- آسایش حرارتی

شاخص میانگین آراء⁷ (PMV) برای سنجش احساس حرارتی افراد و ارزیابی شرایط حرارتی محیط توسط فنگر [6] ارائه شد. لین و دنگ [7] در سال 2008 معیار فنگر و شاخص میانگین آراء افراد را برای حالت خواب بازنگری کردند و رابطه (4) را برای پیش‌بینی احساس حرارتی افراد در هنگام خواب ارائه کردند.

خروجی هوا بر عملکرد سیستم تهویه مطبوع متمرکز ساده را برای حالت خواب پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که با نزدیک کردن دریچه ورودی و خروجی هوا به محل قرارگیری انسان می‌توان بهره‌وری انرژی را افزایش داد. اما این کار موجب توزیع غیر یکنواخت سرعت و دما در محل حضور فرد خواهد شد.

ذوالفقاری و همکاران [5] به تحلیل عددی میزان تأثیر دبی و دمای هوای ورودی بر عملکرد سیستم گرمایش متمرکز برای حالت خواب پرداختند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که هرچه دبی بیشتر می‌شود ضریب بهره‌وری افت کرده و میزان مصرف انرژی بالا می‌رود و دبی پایین نیز باعث توزیع ناهمگون سرعت و دما می‌شود.

بر اساس آنچه که گفته شد، تاکنون تحقیق جامعی بر روی عملکرد سیستم تهویه مطبوع متمرکز برای گرمایش با مدل‌سازی همزمان شرایط آسایش حرارتی افراد و عوامل ناراضی‌موضع¹ در هنگام خواب صورت نگرفته است. این در حالی است که به نظر می‌رسد سیستم‌های متمرکز به دلیل وزش نسبتاً شدید بر روی بدن، ممکن است موجب رخداد ناراضی‌ناشی از کوران در افراد شوند. لذا در تحقیق حاضر، سعی شده است تا با مدل‌سازی همزمان تأثیرات سیستم‌های متمرکز در شرایط مختلف، تحلیل مناسبی از ضریب بهره‌وری انرژی² این سیستم و شرایط آسایش حرارتی افراد در هنگام خواب ارائه شود.

2- فضای نمونه

در تحقیق حاضر، هندسه‌ای مطابق تحقیق مائو و همکاران [2] به عنوان فضای نمونه انتخاب شده است. بنابراین اتاقی با طول، عرض و ارتفاع 3.6 و 2.6 و 2.5 متر در نظر گرفته شده است که تخت‌خوابی در یک سمت اتاق قرار دارد. دریچه‌ای به ابعاد 57×21 سانتی متر مربع روی دیوار و در ارتفاع 20 سانتی متری بالای تخت‌خواب و یک دریچه خروجی به ابعاد 37×16 سانتی متر مربع پایین تخت‌خواب تعبیه شده است. همچنین هندسه‌ای ساده از بدن انسان به صورت خوابیده روی تخت مدل‌سازی شده است. "شکل 1" نمای کلی و ابعاد فضای نمونه را نشان می‌دهد.

3- معادلات حاکم و روش حل

1-3- جریان و انرژی

در این تحقیق، به‌منظور تحلیل جریان و انرژی از معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی و معادله انرژی تحت شرایط پایا و غیرقابل تراکم³ استفاده می‌شود

⁴ Open Foam

⁵ Businessq Buoyant Simple Foam

⁶ Finite Volume

⁷ Predicted Mean Vote (PMV)

¹ Local Thermal Discomfort

² Energy Utilization Coefficient (EUC)

³ Boussinesq approximation

جدول 1 مشخصه‌های عملکردی سیستم تهویه متمرکز با در نظر گرفتن قید آسایش حرارتی

Table 1 Performance parameters of personalized ventilation system with considering thermal comfort

دبی هوای ورودی (lit/s)	دمای هوای ورودی (K)	متوسط دمای دیوارها (K)	متوسط دمای اتاق (K)	متوسط دمای ناحیه اشغال نشده (K)	متوسط دمای ناحیه اشغال شده (K)	بیشینه DR در محل حضور فرد	بیشینه PMV در محل حضور فرد	کمینه PMV در بهره‌وری مصرف انرژی	ضریب مصرف انرژی
60	303.65	288.15	293.989	293.967	294.427	7.24	-0.242	-0.498	1.049816
80	300.65	288.15	293.672	293.625	294.637	10.31	-0.173	-0.513	1.168346
100	299.65	288.15	294.271	294.203	295.665	17.17	0.080	-0.483	1.366945

شده که در ناحیه اشغال شده، شاخص میانگین آراء افراد در محدوده مجاز باشد (کمینه مقدار PMV در محدوده حضور فرد برابر با 0.5- شود). بر این اساس، هر چه دبی جریان ورودی افزایش یابد، باید دمای هوای ورودی کم شود تا شرایط آسایش حرارتی در همه حالت‌ها به شکل مشابهی حفظ شود. همچنین زاویه وزش از دریچه به نحوی تنظیم شده (10 درجه رو به پایین) که توزیع مناسبی از دما، سرعت و پارامتر PMV در محل حضور فرد ایجاد شود.

همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود اختلاف بین کمینه و بیشینه PMV با دبی رابطه مستقیم دارد به نحوی که هر چه دبی بیشتر شود این اختلاف افزایش می‌یابد. این امر ناشی از این می‌باشد که در دبی کم، دما بیشتر است. در این حالت با وجود این که گرما به مقدار کمی در منطقه اشغال شده نفوذ می‌کند و در همان ابتدا بخاطر چگالی زیاد وارد منطقه اشغال نشده می‌شود و منطقه وسیعی را پوشش می‌دهد که باعث تأثیرپذیری در منطقه اشغال شده می‌شود و PMV را در مقدار کمی نگه می‌دارد.

بیشینه درصد ناراضیاتی موضعی ناشی از کوران با افزایش دبی ورودی افزایش می‌یابد. علت افزایش درصد ناراضیاتی موضعی ناشی از کوران این است که طبق رابطه تجربی (5) مقدار این شاخص با سرعت هوا رابطه مستقیم و با دما رابطه عکس دارد.

با توجه به جدول 1 هر چه دبی بالاتر می‌رود مصرف انرژی کمتر می‌شود. به این ترتیب به نظر می‌رسد هرچه ضریب بهره‌وری انرژی افزایش پیدا کند مصرف انرژی کم می‌شود. در "شکل 2" کانتور اندازه دما و در "شکل 3" کانتور اندازه سرعت برای صفحه گذرنده از مرکز اتاق برای سه دبی 60، 80 و 100 لیتر بر ثانیه ارائه شده است.

با دقت در "شکل‌های 2 و 3" و نحوه توزیع مشخصه‌های جریانی، می‌توان نحوه ریزش جریان هوا از سیستم گرمایش متمرکز را به ازای دبی‌های مختلف با هم مقایسه نمود. هر چه دبی بیشتر باشد منطقه اشغال شده دارای دما بیشتری می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی هوای ورودی، ناحیه تأثیرگذاری سیستم تهویه متمرکز به شدت بزرگ می‌شود. این امر نشان می‌دهد که در صورت افزایش دبی هوای ورودی، عملکرد سیستم مذکور به سیستم‌های فراگیر نزدیک می‌شود. مشکل دیگری که در گرمایش وجود دارد این است که در دبی پایین نیز گرما به علت چگالی و سرعت کم در قسمت بسیار کمی از منطقه اشغال شده نفوذ می‌کند که موجب بزرگ شدن مخرج کسر فرمول محاسبه بهره‌وری انرژی شده و در نتیجه ضریب بهره‌وری کاهش می‌یابد.

$$PMV = 0.0998 \left\{ 40 - \frac{1}{R_t} \left[\left(34.6 - \frac{4.7\bar{t}_r + h_c t_a}{4.7 + h_c} \right) + 0.3762(5.52 - p_a) \right] - 0.0998[0.056(34 - t_a) + 0.692(5.87 - p_a)] \right\} \quad (4)$$

که h_c ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطح می‌باشد که براساس داده‌ها و روش ارائه شده در دست‌نامه بنیادی اشرفی [8] محاسبه می‌شود. \bar{t}_r دمای میانگین تابشی، t_a دمای هوای محیط و p_a فشار بخار هوا در دمای محیط و R_t مقاومت حرارتی کلی برای سیستم تخت خواب است.

در تحقیق حاضر فرض شده است که فرد بر روی تخت‌خوابی با یک تشک معمولی و با لباسی نازک که تمام بدنش را پوشانده خوابیده، طبق نتایج لین و دنگ [7] که در یک تحقیق تجربی، مقاومت کلی برای رو انداز و تخت‌خواب‌های رایج را ارائه کرده‌اند، مقاومت کل میان بدن و محیط در این وضعیت، $1.53 \text{ W}^{-1}\text{m}^2\text{K}$ در نظر گرفته می‌شود.

3-3- شاخص ناراضیاتی حرارتی موضعی ناشی از کوران

یکی از عوامل ناراضیاتی حرارتی، احساس سرمای موضعی به علت جریان هوا می‌باشد. به این پدیده نامطلوب اصطلاحاً کوران¹ گفته می‌شود. درصد افرادی که در یک محیط از رخداد کوران ابراز ناراضیاتی می‌کنند از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید [9]:

$$DR = (34 - t_a)(v - 0.05)^{0.62}(0.37vT_u + 3.14) \quad (5)$$

که DR درصد ناراضیاتی افراد ناشی از پدیده کوران، v سرعت جریان هوا، t_a دمای هوا و T_u شدت اغتشاشات جریان وزشی می‌باشد. براساس استاندارد 55 اشرفی [9] مقدار شاخص DR نباید بیشتر از 20 درصد باشد.

3-4- ضریب بهره‌وری انرژی

ضریب بهره‌وری شاخصی برای سنجش میزان کارآمدی سیستم تهویه متمرکز است و بیانگر این است که تا چه حد سیستم تهویه بر روی هدف اصلی یعنی تهویه محیط اشغال شده توسط انسان‌ها متمرکز شده است. این پارامتر پیش از این توسط لین و همکاران [10] به صورت رابطه (6) تعریف شده است:

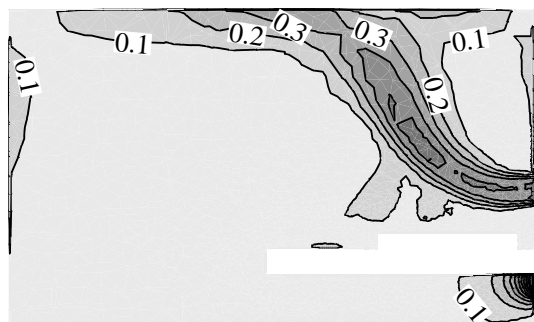
$$EUC = \frac{t_{uz} - t_s}{t_{oz} - t_s} \quad (6)$$

که t_{uz} و t_{oz} به ترتیب دمای متوسط هوا در قسمت اشغال نشده و در قسمت اشغال شده و t_s بیانگر دمای هوای ورودی در سیستم تهویه متمرکز می‌باشد.

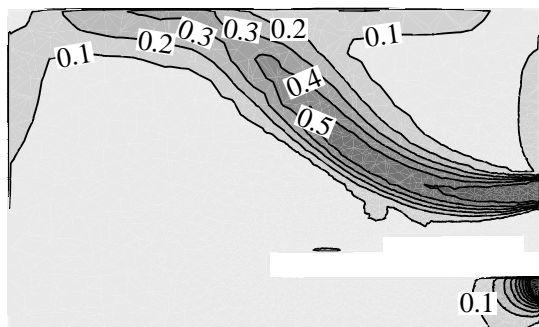
4- نتایج و بحث

هدف تحقیق حاضر، بررسی عملکرد گرمایش سیستم تهویه متمرکز بر شرایط آسایش حرارتی در هنگام خواب می‌باشد. دمای هوای ورودی طوری تنظیم

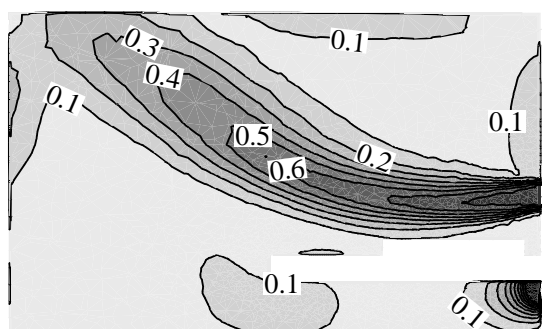
¹ Draught



(الف) (a)



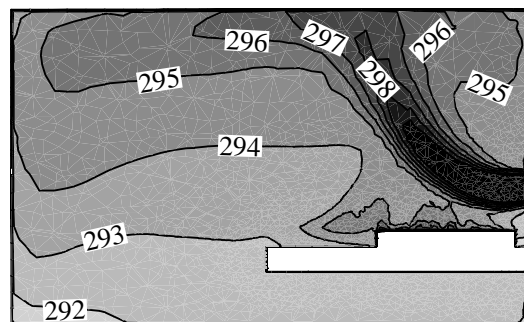
(ب) (b)



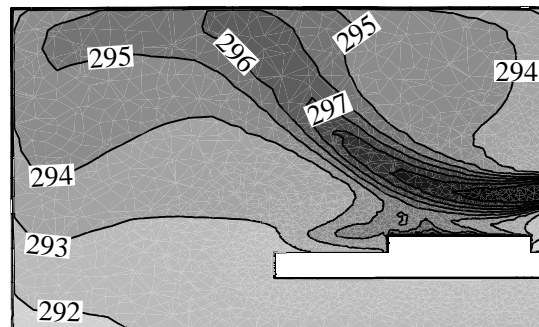
(ج) (c)

Fig. 3 Velocity contours in the plane through the center of the room (a) debi 60 (lit/s) (b) debi 80 (lit/s) (c) debi 100 (lit/s)

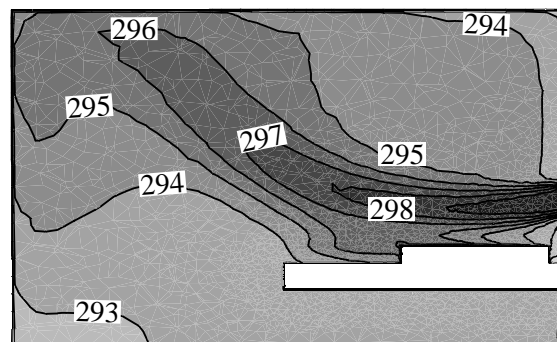
شکل 3 کانطور اندازه سرعت در صفحه گذرنده از مرکز اتاق (الف) دبی 60 لیتر برثانیه (ب) دبی 80 لیتر برثانیه (الف) دبی 100 لیتر برثانیه



(الف) (a)



(ب) (b)



(ج) (c)

Fig. 2 Temperature contours in the plane through the center of the room (a) debi 60 (lit/s) (b) debi 80 (lit/s) (c) debi 100 (lit/s)

شکل 2 کانطور دما در صفحه گذرنده از مرکز اتاق (الف) دبی 60 لیتر برثانیه (ب) دبی 80 لیتر برثانیه (الف) دبی 100 لیتر برثانیه

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی عملکرد یک سیستم تهویه متمرکز مورد استفاده برای گرمایش هنگام خواب پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دبی بالا، گستره عملکرد سیستم مذکور به ناحیه حضور افراد محدود نمی‌شود بلکه بخش قابل توجهی از فضای اتاق را متأثر می‌کند. همچنین در دبی کم نیز توزیع ناهمگن دما و سرعت موجب توزیع ناهمگن شاخص آسایش حرارتی در محل حضور فرد می‌گردد. بر این اساس، توصیه می‌گردد در سیستم تهویه متمرکز از وزش جریان با دبی بسیار بالا یا پایین پرهیز گردد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که بیشینه درصد ناراضیاتی موضعی ناشی از کوران در تمام دبی‌ها در محدوده مجاز و کمتر از 18 درصد قرار گرفته است. همچنین با افزایش دبی ضریب بهره‌وری انرژی برای سیستم تهویه متمرکز افزایش می‌یابد

6- فهرست علائم

\vec{g}	شتاب گرانش (ms^{-2})
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی در سطح ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
PMV	میانگین آراء افراد نسبت به شرایط حرارتی محیط
R_t	مقاومت حرارتی کلی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
T	دما (K)
\bar{t}_r	دمای متوسط تابشی (K)
t_a	دمای هوای محیط (K)
T_u	شدت توربولانسی (%)

- [2] N. Mao, D.M. Pan, M. Chan, S.M. Deng. Experimental and numerical studies on the performance evaluation of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system. *Applied Energy*, Vol. 136, pp. 956-967, 2014.
- [3] N. Mao, D.M. Pan, M. Chan, S.M. Deng. Performance evaluation of an air conditioning system with different heights of supply outlet applied to a sleeping environment, *Energy and Buildings*, Vol. 77, pp. 281-291, 2014.
- [4] N. Mao, D.M. Pan, M. Chan, S.M. Deng. Thermal, ventilation and energy saving performance evaluations of a ductless bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system, *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 297-305, 2013.
- [5] A. Zolfaghari, A. Foadaddini, M. Hooshmand, Performance analysis of a task/ambient air conditioning system for providing the thermal comfort conditions during sleep, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp 368-376, 2016. (in Persian فارسی)
- [6] P.O. Fanger, *Thermal comfort*, Copenhagen: Danish Technical Press, pp. 110-115, 1970.
- [7] Z.P. Lin, S.M. Deng, A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics - developing a thermal comfort model for sleeping environments, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 70-81, 2008.
- [8] ASHRAE. *ASHRAE handbook of fundamentals*, Atlanta, 2001.
- [9] ASHRAE, ASHRAE Standard 55-2013, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, p. 12, 2013.
- [10] W.W. Liu, Z.W. Lian, Y. Yao, Optimization on indoor air diffusion of floor-standing type room air-conditioners, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 59-70, 2000.

- t_{uz} دمای متوسط هوا در قسمت اشغال نشده (K)
- t_{oz} دمای متوسط هوا در قسمت اشغال شده (K)
- t_s دمای هوای ورودی (K)
- \vec{v} بردار سرعت

علائم یونانی

- α ضریب نفوذ (kgm^{-3})
- β ضریب انبساط حجمی (K^{-1})

زیر نویس ها

- eff موثر
- oz قسمت اشغال شده
- r تشعشعی
- ref مرجع
- t اغتشاشی
- uz قسمت اشغال نشده

7- مراجع

- [1] D.M. Pan, M. Chan, L. Xia, X. Xu, Performance evaluation of a novel bed-based task/ambient conditioning (TAC) system, *Energy and Buildings*, Vol. 44, pp. 54-62, 2012.