Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 113-116
DOI: 10.22060/mej.2019.15664.6178

Effect of Gender and Body Fitness on the Thermal Sensation of Sleeping Occupants Under Task-Ambient Air Conditioning System

A. Foadaddini, F. Davoodi, S. M. Hooshmand, S. A. Zolfaghari*, H. Hassanzadeh

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

ABSTRACT: Providing thermal comfort conditions in a sleeping environment can significantly affect the occupants' health. So, the parameters of the air conditioning system must be properly set to satisfy thermal comfort criteria for persons with different physiological characteristics. In the present study, a task/ambient air conditioning system is modeled and the effect of gender and body mass index on the thermal sensation has been analyzed by an individualized three-node model. Results show that although Gagge standard model predicts pleasant thermal comfort condition, thermal sensation index varies from -0.63 to 0.66 based on the individualized three-node model, and in some cases exceed the thermal comfort region. Moreover, healthy and fat people have a warm sensation in clothed parts of the body and underweight people, especially women, have a cold sensation in bare parts of the body. Also, based on the results of women compared with men, and underweight people compared with overweight people feel colder. By changing body mass index, the thermal sensation index can change up to 0.36, which is very significant in the assessment of thermal comfort.

Review History:

Received: 2019-01-18
Revised: 2019-05-17
Accepted: 2019-07-08
Available Online: 2019-07-27

Keywords:

Task-ambient conditioning systems
Individual three-node model
thermal comfort
Sleeping environment

1. INTRODUCTION

People spend about one-third of their time sleeping. Therefore, having a quiet and comfortable sleep has a significant effect on increasing the efficiency of individuals during daily activities. Improving the quality of sleep is of particular importance due to its significant effect on the physical and mental health of humans. Research shows that the thermal condition of the environment is one of the factors which contribute to the improvement of sleep quality [1] and the quality of sleep decreases when the thermal condition is out of the thermal comfort range [2]. Due to the immobility of the person, while sleeping, Task-Ambient Conditioning (TAC) systems are suitable for conditioning the sleep environment. These systems allow building residents to individually make thermal adjustments to each area of the building [3]. These systems can provide suitable thermal conditions in addition to controlling local temperature and improving air quality in the inhalation area [4, 5]. Also, they can significantly reduce energy consumption [6]. Ning et al. [7] and Mao et al. [8] concluded that by approaching the inlet and outlet vent to the person's position, energy efficiency can be increased, but this will result in uneven distribution of speed and temperature at the occupied zone. In another study, Mao et al. [9] showed that TAC systems exacerbated the uneven distribution of skin temperature. Zolfaghari et al. [10] studied thermal comfort and dissatisfaction due to draught in a TAC system for the sleeping environment. The results show that the system can prevent dissatisfaction due to draught while maintaining the desired thermal comfort condition. In all researches about thermal comfort in the sleeping environment, the Fanger model has been used. Fanger's model is steady and doesn't simulate a biological thermoregulatory system of the body. Also, this model is a one-node model which simulate the body as a one unit. Zolfaghari and Marefat [11] presented a 3-node model based on Gagge standard model [12] which simulates the bare and clothed skin and body core temperature. Davoodi et al. [13] develop the 3-node model and introduced an individual model which simulates personal factors such as gender, basal metabolic, age and body mass index. In the present study, using the mentioned individual 3-node model, thermal sensation for a sleeping person is simulated in the bare and clothed part of the body according to gender and body mass index.

2. METHODOLOGY

TAC system is investigated under 3 different settings (A, B and C) with different 3 different supply airflow (60 l/s, 80 l/s, and 100 l/s). All of them provide favorable thermal sensations according to Gagge standard model. To simulate the effect of gender and Body Mass Index (BMI) on thermal comfort, the Individual 3-node model is used. This model has three special features which improve the accuracy of the simulations compared to the Fanger's model [18]:

1. The thermoregulatory mechanism of the body is included at the individual 3-node model.

*Corresponding author's email: zolfaghari@birjand.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. $TSENS_{ov}$ in the warmest location

Gender	*BMI*	Thermal Sensation		
		setting A	setting B	setting C
men	normal	0.34	0.35	0.36
	<18.5	0.14	0.18	0.21
	>25	0.45	0.47	0.49
women	normal	0.4	0.33	0.33
	<18.5	0.17	0.2	0.22
	>25	0.47	0.49	0.53

Table 2. $TSENS_{ov}$ in the coldest location

Gender	*BMI*	Thermal Sensation		
		setting A	setting B	setting C
men	normal	-0.15	-0.12	-0.12
	<18.5	-0.27	-0.2	-0.22
	>25	0	0	0.02
women	normal	-0.18	-0.14	-0.14
	<18.5	-0.34	-0.3	-0.33
	>25	-0.05	0.04	0.06

Table 3. $TSENS_{br}$ in the coldest location

Gender	*BMI*	Thermal Sensation		
		setting A	setting B	setting C
men	normal	0.55	0.58	0.58
	<18.5	0.22	0.3	0.36
	>25	0.58	0.6	0.62
women	normal	0.59	0.59	0.59
	<18.5	0.26	0.31	0.37
	>25	0.61	0.63	0.66

Table 4. $TSENS_{cl}$ in the coldest location

Gender	*BMI*	Thermal Sensation		
		setting A	setting B	setting C
men	normal	0.55	0.58	0.58
	<18.5	0.22	0.3	0.36
	>25	0.58	0.6	0.62
women	normal	0.59	0.59	0.59
	<18.5	0.26	0.31	0.37
	>25	0.61	0.63	0.66

2. In this model, the body is divided into 3 parts: core body, bare skin and clothed skin.

3. This model simulates personal factors like age, gender, weight, and height.

Above mentioned personal factors are given to the model as input and dependent factors like body fat percentage, body heat capacity and a heat resistance of body tissue are calculated using them. In the present study, based on BMI, individuals in each gender are classified as normal weight ($18.5<BMI<25$), underweight ($BMI<18.5$) and overweight ($BMI>25$). To analyze the most critical situations, the warmest and coldest location near the person is considered.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The overall thermal sensation ($TSENS_{ov}$) for the warmest and the coldest locations is presented in Table 1 and Table 2. As can be seen, according to the individual 3-node model, thermal sensation for men and women with different BMIs lies in the comfort range ($0.5<TSENS_{ov}<0.5$). Also, results show that overall thermal sensation for women is more effected by cold conditions compared with men. Underweight people feel colder and overweight people feel warmer compared with normal people.

Table 3 presents the thermal sensation for the bare part of the skin at the coldest location. Although the overall thermal sensation lies in the comfort range, people have a cold sensation at the bare part of the skin. As seen, the situation is more critical for underweight women with $TSENS_{br}= -0.63$ for setting A. Table 4 presents the thermal sensation for the clothed part of the skin at the warmest location. As shown, normal and overweight people have a warm sensation at the clothed part of the skin but underweight people experience the favorable thermal condition.

4. CONCLUSIONS

In this study, a task/ambient air conditioning system is modeled and the effect of gender and body mass index on thermal sensation has been analyzed by an individualized 3-node model. TAC system is investigated under 3 different settings which all of them provide favorable thermal conditions according to the Gagge standard model. Results show that although Gagge standard model predicts pleasant thermal comfort condition, thermal sensation index varies from -0.63 to 0.66 based on the individualized three-node model, and in some cases exceed the thermal comfort region. Moreover, healthy and fat people have a warm sensation in clothed parts of the body and thin people, especially women, have a cold sensation in the bare parts of the body. Also, based on the results of women compared with men, and thin people compared with overweight people feel colder. By changing BMI, the thermal sensation index can change up to 0.36, which is very significant in the assessment of thermal comfort.

5. REFERENCES

[1] A. Hobson, *Sleep Scientific American*, Inc., New York, (1989)

[2] P. Dongmei, D. Shiming, L. Zhongping, C. Ming-yin, Air-conditioning for sleeping environments in tropics and/or sub-tropics–A review, *Energy*, 51 (2013) 18-26.

[3] F. Bauman, E.A. Arens, Task/ambient conditioning systems: engineering and application guidelines, *Center for Environmental Design Research*, University of California, Berkeley, (1996)

[4] F. Bauman, H. Zhang, E.A. Arens, C. Benton, Localized comfort

control with a desktop task conditioning system: laboratory and field measurements, *ASHRAE Transactions*, 99 (1993).

[5] R. Shute, Integrated access floor HVAC: lessons learned, 0001-2505, *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Inc., Atlanta, GA (United States), (1995)

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

[7] M. Ning, P. Dongmei, C. Mingyin, D. Shiming, Experimental and numerical studies on the performance evaluation of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system, *Applied energy*, 136 (2014) 956-967.

[8] N. Mao, D. Pan, S. Deng, M. Chan, Thermal, ventilation and energy saving performance evaluations of a ductless bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system, *Energy and Buildings*, 66 (2013) 297-305.

[9] N. Mao, M. Song, S. Deng, D. Pan, S. Chen, Experimental and numerical study on air flow and moisture transport in sleeping environments with a task/ambient air conditioning (TAC) system, *Energy and Buildings*, 133 (2016) 596-604.

[10] A. Zolfaghari, A. Foadaddini, M. Hooshmand, Performance analysis of task/ambient air conditioning system for providing the thermal comfort conditions during sleep, *Modares Mechanical Engineering*, 15(10) (2015) 302-310, (in Persian).

[11] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing, *Building and Environment*, 45(3) (2010) 776-783.

[12] A.P. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Transactions*, 92 (1986)

[13] F. Davoodi, H. Hasanzadeh, S.A. Zolfaghari, M. Maerefat, Developing three-node model to estimate individual characteristics effects on thermal sensation and human body thermoregulation *Modares Mechanical Engineering*, 16(8) (2016) 149-158, (in Persian).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Foadaddini, F. Davoodi, S.M. Hooshmand, S.A. zolfaghari, H. Hassanzadeh, Effect of gender and body fitness on thermal sensation of sleeping occupants under task-ambient air conditioning system, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 113-116.

DOI: 10.22060/mej.2019.15664.6178

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۵۳ تا ۴۶۶
DOI: 10.22060/mej.2019.15664.6178

تاثیر جنسیت و تناسب بدنی بر احساس حرارتی افراد خوابیده تحت سیستم تهویه متمرکز

علی فوادالدینی، فرزین داودی، سید محمد هوشمند، سید علیرضا ذوالفقاری* ، حسن حسن‌زاده

دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

خلاصه: برقراری شرایط آسایش حرارتی در محیط خواب می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر سلامتی انسان‌ها داشته باشد. بنابراین سیستم تهویه مطبوع باید به نحوی تنظیم شود که برای افراد با شرایط فیزیولوژیکی متفاوت، شرایط آسایش حرارتی مطلوب فراهم شود. در تحقیق حاضر، یک سیستم تهویه متمرکز برای محیط خواب مدل‌سازی شده و با استفاده از مدل سه‌نقطه‌ای فردی، تاثیر جنسیت و وزن بر احساس حرارتی افراد تحلیل شده است. بر طبق نتایج، علی‌رغم این‌که مدل استاندارد گایج احساس حرارتی افراد را در ناحیه مطلوب پیش‌بینی می‌کند؛ ولی بر اساس مدل سه‌نقطه‌ای فردی، شاخص احساس حرارتی از مقدار ۰/۶۳- تا ۰/۶۶ متغیر است و در مواردی از محدوده آسایش حرارتی خارج می‌شود. ضمن این‌که افراد با تناسب وزنی و افراد چاق در نقاط پوشیده بدن احساس گرما دارند و افراد لاغر، به خصوص زنان در بخش‌های فاقد پوشش، احساس سرما می‌کنند. همچنین، بر اساس این نتایج زنان نسبت به مردان و افراد لاغر نسبت به افراد چاق احساس سرمای بیشتری می‌کنند. بر اساس نتایج به دست آمده، با تغییر شاخص توده بدنی افراد، شاخص احساس حرارتی افراد می‌تواند تا نزدیک به ۰/۳۶ واحد تغییر کند که این امر در ارزیابی آسایش حرارتی بسیار قابل توجه است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۲۸-۱۰-۱۳۹۷
بازنگری: ۲۷-۰۲-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۷-۰۴-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۰۵-۰۵-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
سیستم تهویه مطبوع متمرکز
مدل سه‌نقطه‌ای آسایش حرارتی فردی
محیط خواب

۱- مقدمه

انسان‌ها در هر شبانه روز حدود یک سوم از وقت خود را جهت تجدید قوا در خواب می‌گذرانند. لذا داشتن یک خواب آرام و راحت تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش کارایی افراد در طی فعالیت روزانه دارد. بهبود کیفیت خواب، به دلیل تأثیر قابل توجهی که می‌تواند بر سلامت جسم و روان انسان‌ها داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحقیقات نشان می‌دهد که عوامل ذهنی و جسمی متعددی در بهبود کیفیت خواب دخیل هستند [۱]. یکی از این عوامل، شرایط حرارتی محیط است و تحقیقات تجربی نشان می‌دهد که وقتی محیط از محدوده آسایش حرارتی دور می‌شود، کیفیت خواب کاهش می‌یابد [۲]. بهره‌گیری از مزایای سیستم‌های تهویه متمرکز منحصر به استفاده در محیط فعالیت روزانه نیست و می‌تواند در محیط خواب نیز مورد استفاده قرار بگیرد؛ چرا که در هنگام خواب به دلیل ثابت و محدود بودن موقعیت خواب افراد، به نظر می‌رسد که بتوان از سیستم‌های تهویه مطبوع به نحو بسیار موثری برای ارتقای شرایط آسایش حرارتی افراد استفاده نمود.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه آسایش حرارتی در محیط خواب انجام شده است. لین و دنگ [۳] در یک تحقیق آزمایشگاهی نشان دادند که انتخاب مناسب و صحیح لباس، رو انداز و رخت‌خواب به عنوان مقاومت حرارتی میان بدن و محیط می‌تواند موجب دستیابی به شرایط آسایش حرارتی مطلوبتر با صرف انرژی کمتری شود. همچنین ایشان نشان دادند که در مناطق گرم و مرطوب، کاهش مقاومت حرارتی ناشی از لباس و رخت‌خواب برای رسیدن به شرایط آسایش حرارتی مطلوب در هنگام خواب کافی نیست و باید الزاماً از وسایل تهویه مطبوع مناسب نیز استفاده شود. با این وجود، لین و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zolfaghari@birjand.ac.ir

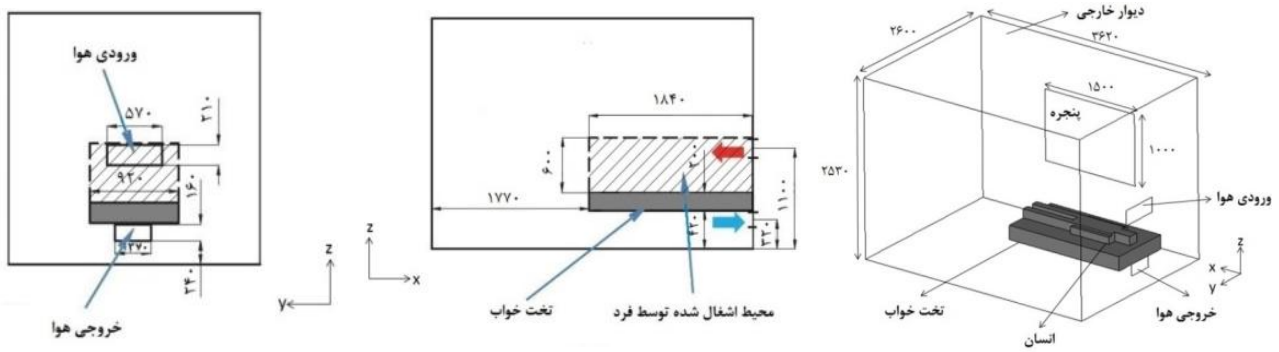
حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

دنگ [۴] در یک مطالعه پیمایش میدانی نشان دادند که غالبا مردم مناطق گرم و مرطوب، به منظور کاهش هزینه انرژی از سیستم تهویه مطبوع در زمان خواب استفاده نمی‌کنند. بنابراین توسعه سیستم‌های تهویه مطبوع مناسب برای محیط خواب با هدف کاهش مصرف انرژی ضمن دستیابی به شرایط آسایش حرارتی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از انواع سیستم‌های تهویه مطبوع، که امکانات ویژه‌ای را برای آسایش حرارتی ساکنان فراهم می‌کند، سیستم‌های تهویه مطبوع متمرکز[1] هستند. این سیستم‌ها بر خلاف سیستم‌های تهویه فراگیر[2] به ساکنان ساختمان‌ها اجازه می‌دهند تا تنظیمات حرارتی نواحی خاص ساختمان را به صورت مجزا انجام داده؛ در حالی که شرایط گرمایی بقیه نقاط اتاق می‌تواند آزادانه نوسان کند [۵]. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی برای بررسی عملکرد این سیستم‌ها در محیط فعالیت روزانه صورت گرفته است [۶ و ۷]. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تهویه متمرکز می‌تواند علاوه بر کنترل دمای محلی و بهبود کیفیت هوا در ناحیه استنشاقی، شرایط مطلوب آسایش حرارتی را برای ساکنان فراهم کند. پان و همکاران [۸] در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی عملکرد یک سیستم متمرکز برای حالت خواب پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند موجب کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی شود. همچنین نینگ و همکاران [۹] مائو و همکاران [۱۰ و ۱۱] در تحقیقاتی گسترده، عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع متمرکز ساده را برای حالت خواب مورد بررسی قرار داده و با تحلیل آزمایشگاهی و عددی، تاثیر جانمایی دریچه‌های ورودی و خروجی هوا را بر عملکرد این سیستم بررسی کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که بکارگیری این سیستم موجب صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی می‌شود. همچنین، این تحقیقات نشان می‌دهد که با نزدیک شدن دریچه ورودی و خروجی هوا به محل قرارگیری شخص خوابیده، می‌توان بهره‌وری انرژی را افزایش داد؛ ولی این کار موجب توزیع غیریکنواخت سرعت و دما در محل حضور شخص خواهد شد. همچنین مائو و همکاران [۱۲] در یک تحقیق آزمایشگاهی و عددی، سیستم متمرکز را به لحاظ جریان هوا و انتقال رطوبت مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که این سیستم، توزیع غیریکنواخت دمای پوست را تشدید می‌کند. همچنین اگرچه در این سیستم مقدار اختلاف دمای ناحیه سر و مچ پا نسبت به سیستم‌های غیرمتمرکز افزایش می‌یابد، با این حال این مقدار در محدوده مجاز استاندارد اشری[3] قرار دارد. در سال ۲۰۱۶، ذوالفقاری و همکاران [۱۳] به تحلیل همزمان شرایط آسایش حرارتی و نارضایتی ناشی از کوران در یک سیستم تهویه متمرکز در محیط خواب پرداختند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند ضمن برقراری شرایط آسایش حرارتی مطلوب، از بروز نارضایتی ناشی از کوران جلوگیری نماید. مائو و همکاران در تحقیقی دیگر [۱۴] تاثیر بار حرارتی دریافتی از پوسته را بر عملکرد سیستم پیشنهادی خود مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عددی مدل آسایش حرارتی فنگر برای تحلیل آسایش حرارتی افراد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش بار حرارتی دریافتی از ساختمان، انرژی مورد نیاز برای برقراری شرایط مناسب آسایش حرارتی افزایش می‌یابد.

در تمامی تحقیقات انجام شده در زمینه آسایش حرارتی در محیط خواب، از مدل ساده و پایای فنگر [۱۵] استفاده شده است. در این مدل ساده، سازوکارهای تنظیم حرارتی بدن نظیر تعرق، لرز و اتساع و انقباض عروق مدل‌سازی نشده و این مدل قادر به مدل‌سازی حالت گذرا نمی‌باشد. علاوه بر این، در مدل‌های رایج و استاندارد، توزیع لباس روی پوست کاملا یکنواخت فرض شده است؛ به‌طوری‌که تفاوتی میان احساس حرارتی قسمت‌های برهنه و پوشیده بدن وجود نداشته و فقط یک شاخص آسایش برای تمام بدن ارایه می‌شود. همچنین در مدل‌های آسایش حرارتی رایج و بر پایه جمعیت (نظیر فنگر) از تأثیر عوامل فردی (از قبیل سن، وزن، قد و جنسیت) صرف‌نظر شده است؛ عواملی که نقش قابل ملاحظه‌ای در تنظیم حرارتی بدن برعهده دارند [۱۶].

برخلاف تحقیقات پیشین یکی از موارد مهم در تحقیق حاضر، توجه به ویژگی‌های فردی است. سیستم‌های فراگیر بخش بزرگی از فضا را به لحاظ حرارتی تحت تاثیر قرار می‌دهند بنابراین باید به نحوی تنظیم شوند که شرایط آسایش را برای تمامی ساکنان تا حد امکان برقرار سازند. در چنین شرایطی نمی‌توان تنظیمات سیستم را برای افرادی با ویژگی فیزیولوژیکی ویژه تغییر داد. اما یکی از ویژگی‌های اساسی سیستم‌های متمرکز قابلیت آن‌ها برای محدود نمودن تهویه به ناحیه خاصی از فضا و محل حضور فرد است. به این

1 Task-Ambient Conditioning (TAC)
2 Full Air-conditioning (FAC)
3 ASHRAE Standard



الف) نمای سه‌بعدی هندسه
a) ۳D view of the room

ب) برش طولی هندسه
b) Longitudinal cross section of the room

پ) برش عرضی هندسه
c) Transverse cross section of the room

شکل ۱. طرحواره کلی فضای نمونه و ابعاد آن
Fig. 1. Geometry of the simulated bedroom

ترتیب می‌توان متناسب با ویژگی‌های فیزیولوژیکی هر فرد تنظیمات سیستم را برای برقراری شرایط آسایش حرارتی انتخاب نمود. یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی میزان اهمیت ویژگی‌ها فیزیولوژیکی افراد در انتخاب تنظیمات مناسب برای این سیستم است. از طرف دیگر استفاده از سیستم‌های متمرکز موجب توزیع غیریکنواخت دما و سرعت در محیط می‌شود. در سیستم متمرکز بررسی شده در تحقیق حاضر تفاوت زیادی بین شرایط حرارتی در نقاط مختلف بدن وجود دارد [۱۳]. بررسی میدان دما و سرعت در این سیستم نشان می‌دهد که غالبا نقاط برهنه بدن نظیر سر و پا نسبت به نقاط پوشیده دارای شرایط حرارتی کاملا متفاوتی هستند. بنابراین با توجه به این ویژگی، در تحلیل سیستم‌های متمرکز باید از مدل آسایش حرارتی مناسب برای تمایز نهادن بین نقاط برهنه و پوشیده استفاده شود.

در تحقیق حاضر با توجه به اهداف مذکور، استفاده از یک مدل آسایش حرارتی برای بررسی تاثیر عوامل فیزیولوژیکی و همچنین توزیع پوشش ضروری است. ذوالفقاری و معرفت [۱۷] با اصلاح مدل دو نقطه‌ای گایج [۱۸]، مدلی سه‌نقطه‌ای شامل هسته مرکزی بدن، قسمت پوشیده و قسمت برهنه بدن ارائه کردند و داودی و همکاران [۱۸]، مدل سه‌نقطه‌ای مذکور را توسعه داده و با استفاده از عواملی مانند جنسیت، سن، متابولیک پایه و شاخص توده بدنی مدلی فردی ارائه نمودند. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل سه‌نقطه‌ای فردی، احساس حرارتی فرد در محیط خواب به تفکیک قسمت برهنه و پوشیده بدن و با توجه به عوامل فردی تناسب بدنی و جنسیت شبیه‌سازی شده است.

۲- فضای نمونه

هندسه مورد بررسی در تحقیق حاضر، مانند هندسه مورد استفاده در تحقیق ذوالفقاری و همکاران [۱۳] بوده که در شکل ۱ نمای کلی و ابعاد آن نشان داده شده است. بر این اساس، فضای نمونه، اتاقی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳/۶، ۲/۶ و ۲/۵ متر می‌باشند که تخت‌خوابی در یک سمت اتاق قرار گرفته است. دریچه هوای ورودی دارای ابعاد ۲۱×۵۷ سانتی‌متر مربع و دریچه خروجی دارای ابعاد ۱۶×۳۷ سانتی‌مترمربع می‌باشد و مطابق شکل ۱ جانمایی شده است.

۳- معادلات حاکم

برای تحلیل جریان از معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی و بقای انرژی تحت شرایط پایا و غیر قابل تراکم با در نظر گرفتن اثرات شناوری حرارتی از طریق تقریب بوزینسک[1] استفاده شده است.

معادله پیوستگی:

$$\nabla.\vec{V} = 0 \qquad (۱)$$

معادله بقای تکانه خطی:

$$\rho(\vec{V}\cdot\nabla\vec{V}) = -\nabla P + \mu_{\text{eff}}\nabla^2\vec{V} + \vec{S} \qquad (۲)$$

معادله انرژی:

$$\vec{V}\cdot\nabla T = \alpha_{\text{eff}}\nabla^2 T + S_T \qquad (۳)$$

1 .Boussinesq Approximation

که:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (۴)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k} \quad (۵)$$

همچنین، $\vec{S}$ بیانگر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود.

$$\vec{S} = \rho g(1 - \beta(T - T_{\text{ref}})) \quad (۶)$$

که β ضریب انبساط حجمی بر حسب و $\vec{g}$ بردار شتاب گرانش زمین بر حسب ms^{-2} است. همچنین، μ_{eff} ضریب لزجت مؤثر سیال است که برابر با حاصل جمع لزجت سیال و لزجت اغتشاشی است:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_{\text{t}} \quad (۷)$$

که لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای کا-اپسیلون[1] $k-\varepsilon$استاندارد محاسبه می‌گردد. همچنین با توجه به استفاده از سیستم وزشی و پایین بودن دمای دیواره‌ها مکانیزم تابش در انتقال حرارت نقش قابل توجهی ندارد بنابراین از آن صرف‌نظر شده است.

معادلات حاکم در تحقیق حاضر توسط حلگر عددی اوپن‌فوم[2] و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل‌فوم[3] حل شده حلگر مذکور برای حل عددی از روش حجم محدود[4] بهره می‌گیرد. ضمن این‌که از الگوریتم سیمپل[5] برای تصحیح جفت شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. در این الگوریتم شرط توقف برای فشار، سرعت و دما به ترتیب $۱۰^{-۳}$، $۱۰^{-۴}$ و $۱۰^{-۵}$ منظور شده است. برای حل مسأله یک شبکه‌بندی غیر سازمان‌یافته ایجاد شده است و در طی حل عددی، استقلال حل از شبکه محاسباتی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و شبکه‌ای با حدود ۴۰۰ هزار گره محاسباتی مناسب تشخیص داده شده است. از طرح عددی مرتبه ۲ برای ترم‌های جابجایی (دیورژانس) و برای محاسبه گرادیان روی سطوح سلول شبکه و محاسبه ترم لاپلاس از طرح عددی مرتبه ۲ همراه با تصحیح (به دلیل استفاده از شبکه غیر سازمان‌یافته) استفاده شده است.

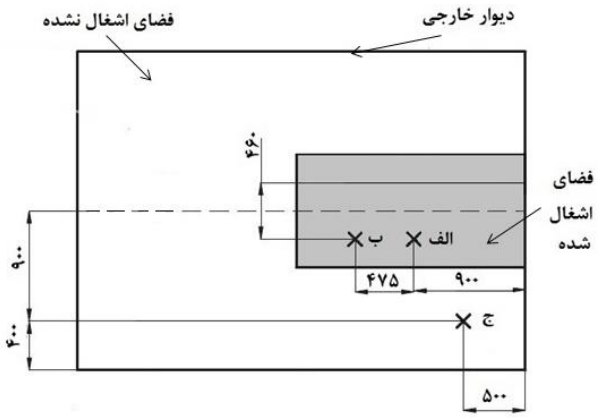
۴- شرط مرزی

جهت بررسی عملکرد سیستم تهویه متمرکز بر آسایش حرارتی در هنگام خواب، هوا با سه نرخ دبی ورودی متفاوت به فضای اتاق وارد می‌شود. بر این اساس، نرخ جریان هوای ورودی در سه حالت A، B و C به ترتیب ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به نتایج تحقیقات ذوالفقاری و همکاران [۱۳] و مائو و همکاران [۱۲] مقادیر مذکور برای نرخ جریان هوای ورودی می‌تواند علاوه بر تامین شرایط مطلوب به لحاظ آسایش حرارتی از نارضایتی ناشی از کوران جلوگیری نماید. همچنین، دمای هوای ورودی از دریچه طبق روشی که در بخش ۷ به طور مفصل شرح داده می‌شود، محاسبه می‌گردد. شرط مرزی دما و سرعت برای دریچه خروجی به صورت گرادیان ثابت و برابر صفر اعمال شده است. اتلاف حرارتی برای درب اتاق و دیوارهای خارجی ۱۸ وات بر مترمربع و برای پنجره ۲۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده که در قالب شرط مرزی گرادیان ثابت روی این سطوح اعمال شده است. مقادیر مذکور بر اساس اندازه گیری تحقیق نینگ و همکاران [۹] انتخاب شده است. برای سطح تخت و کف اتاق نیز گرادیان ثابت برابر صفر منظور شده است. همچنین شرط مرزی برای بدن انسان نیز شار ثابت در نظر گرفته شده است و مقدار آن بر اساس نرخ متابولیک افراد در هنگام خواب برابر با ۴۰ وات بر متر مربع سطح بدن لحاظ شده است. همچنین، با توجه به این‌که معمولا در اتاق‌های بیمارستانی و یا محل استراحت افراد خاص از سیستم‌های تهویه مبتنی بر هواساز استفاده می‌شود؛ لذا امکان کنترل رطوبت نسبی در محدوده مناسب وجود دارد. در نتیجه، در تحقیق حاضر فرض شده است که مقدار رطوبت نسبی هوای اتاق برابر ۵۰ درصد ثابت نگه داشته می‌شود.

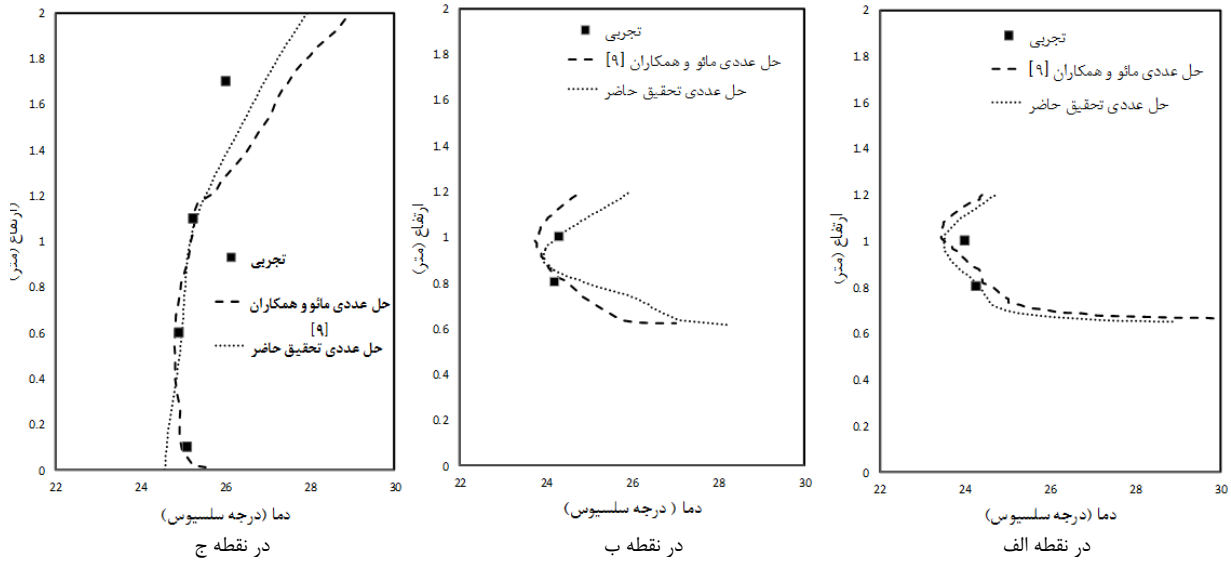
۵- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی و مدل‌سازی عددی مائو و همکاران [۹] به ازای دبی ورودی ۸۰ لیتر بر ثانیه و دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سلسیوس در سه نقطه مختلف از فضای نمونه با هم مقایسه شده است. شکل ۲، محل نقاط مورد بررسی بر روی فضای نمونه را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳ مقایسه میان

1 $k-\varepsilon$
2 .OpenFoam
3 . Buoyant Businesq Simple Foam
4 . Finite Volume
5 . SIMPLE



شکل ۲. نقاط مورد بررسی جهت اعتبارسنجی
Fig. 2. Considered locations for validation



شکل ۳. مقایسه نمودار حل تحقیق حاضر و حل نینگ و همکاران [۹]
Fig. 3. The comparison between predicted and measured data in the present study and Mao et al. [9] study

نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی و عددی نینگ و همکاران [۹] ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، همخوانی نسبتاً مناسبی میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج تجربی و عددی به چشم می‌خورد و همین امر نشان‌دهنده صحت و اعتبار قابل قبول مدل‌سازی حاضر است.

۶- مدل سه‌نقطه‌ای فردی

در مدل فردی سه‌نقطه‌ای، بدن به سه قسمت مرکز، پوست پوشیده و پوست بدون پوشش تقسیم می‌شود. معادلات موازنه انرژی و سازکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت برای هر کدام از این قسمت‌ها به صورت مجزا در نظر گرفته شده است [۱۷]. روابط (۸) تا (۱۰)، معادلات موازنه انرژی برای بخش‌های مرکز، پوست برهنه و پوست پوشیده را نشان می‌دهند. با استفاده از این روابط دمای مرکز بدن، دمای پوست برهنه و پوست پوشیده محاسبه می‌شود.

$$\frac{(1-\alpha)mc_{\mathrm{p,b}}}{A_{\mathrm{D}}}\frac{dT_{\mathrm{cr}}}{dt} = M - W - Q_{\mathrm{res}} - \lambda Q_{\mathrm{cr\text{-}sk,br}} - (1-\lambda)Q_{\mathrm{cr\text{-}sk,cl}} \quad (۸)$$

$$\frac{\mu\alpha mc_{\mathrm{p,b}}}{\lambda A_{\mathrm{D}}}\frac{dT_{\mathrm{sk,br}}}{dt} = Q_{\mathrm{cr\text{-}sk,br}} - (Q_{\mathrm{conv,br}} + Q_{\mathrm{rad,br}} + Q_{\mathrm{ev,br}}) \quad (۹)$$

$$\frac{(1-\mu)\alpha m c_{\mathrm{p,b}}}{(1-\lambda)A_{\mathrm{D}}}\frac{dT_{\mathrm{sk,cl}}}{dt}= Q_{\mathrm{cr\text{-}sk,cl}}-(Q_{\mathrm{conv,cl}}+Q_{\mathrm{rad,cl}}+Q_{\mathrm{ev,cl}}) \quad (۱۰)$$

که در این روابط فوق، λ نسبت سطح قسمت‌های بدون پوشش به سطح کل بدن و μ نسبت جرم قسمت‌های بدون پوشش به جرم کل بدن است. همچنین زیرنویس‌های br و cl به ترتیب نشان‌دهنده قسمت‌های بدون پوشش و دارای پوشش و زیرنویس‌های b، h و c به ترتیب بیانگر بدن، گرما و سرما می‌باشد. سایر جزئیات مربوط به مدل آسایش حرارتی سه‌نقطه‌ای در مرجع [۱۸] ارائه شده است.شاخص احساس حرارتی افراد برای این مدل به‌صورت معادلات زیر بیان می‌شود:

$$TSENS_{\mathrm{ov}}=\begin{cases}0.4685(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{b,c}}) & T_{\mathrm{b}}<T_{\mathrm{b,c}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e}}\dfrac{(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{b,c}})}{(T_{\mathrm{b,h}}-T_{\mathrm{b,c}})} & T_{\mathrm{b,c}}<T_{\mathrm{b}}<T_{\mathrm{b,h}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e}}+0.685(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{b,h}}) & T_{\mathrm{b,h}}<T_{\mathrm{b}}\end{cases} \quad (۱۱)$$

$$TSENS_{\mathrm{br}}=\begin{cases}0.4685(T_{\mathrm{b,br}}-T_{\mathrm{b,c}}) & T_{\mathrm{b,br}}<T_{\mathrm{b,c}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e,br}}\dfrac{(T_{\mathrm{b,br}}-T_{\mathrm{b,c}})}{(T_{\mathrm{b,h}}-T_{\mathrm{b,c}})} & T_{\mathrm{b,c}}<T_{\mathrm{b,br}}<T_{\mathrm{b,h}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e,br}}+0.685(T_{\mathrm{b,br}}-T_{\mathrm{b,h}}) & T_{\mathrm{b,h}}<T_{\mathrm{b,br}}\end{cases} \quad (۱۲)$$

$$TSENS_{\mathrm{cl}}=\begin{cases}0.4685(T_{\mathrm{b,cl}}-T_{\mathrm{b,c}}) & T_{\mathrm{b,cl}}<T_{\mathrm{b,c}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e,cl}}\dfrac{(T_{\mathrm{b,cl}}-T_{\mathrm{b,c}})}{(T_{\mathrm{b,h}}-T_{\mathrm{b,c}})} & T_{\mathrm{b,c}}<T_{\mathrm{b,cl}}<T_{\mathrm{b,h}}\\ 0.47\eta_{\mathrm{e,cl}}+0.685(T_{\mathrm{b,cl}}-T_{\mathrm{b,h}}) & T_{\mathrm{b,h}}<T_{\mathrm{b,cl}}\end{cases} \quad (۱۳)$$

در روابط بالا پارامتر η_{e} بازده تبخیری نامیده می‌شود و مقدار آن برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. تمامی پارامترها و نحوه محاسبه آن‌ها در مراجع [۱۷] و [۱۸] ارائه شده است. در مدل توسعه‌یافته جدید، خصوصیات فردی مانند سن، وزن، قد و جنسیت به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود؛ از طریق این خصوصیات، عوامل فردی تأثیرگذار همچون درصد چربی بدن، ظرفیت گرمایی ویژه بدن، مقاومت حرارتی بافت‌های بدن محاسبه شده [۱۹] و در معادلات مربوط به موازنه انرژی در مدل سه‌نقطه‌ای اصلاح می‌گردد.

۷- روش تحقیق

یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی میزان اهمیت ویژگی‌های فیزیولوژیکی افراد در انتخاب تنظیمات مناسب برای سیستم تهویه متمرکز است. برای بررسی این موضوع، ابتدا تنظیمات سیستم به نحوی صورت می‌گیرد که شرایط آسایش حرارتی فرد بر اساس یک مدل استاندارد که در آن ویژگی‌های فردی منظور نشده است برقرار باشد. سپس به کمک مدل سه‌نقطه‌ای فردی به تحلیل شرایط آسایش افراد با ویژگی‌های فیزیولوژیکی مختلف پرداخته می‌شود. با این شیوه، میزان انحراف شرایط آسایش افراد با ویژگی‌های فیزیولوژیکی مختلف از شرایط آسایش مشخص می‌شود و می‌توان میزان اهمیت ویژگی‌های فیزیولوژیکی را در تنظیمات سیستم برآورد نمود. بعلاوه می‌توان پیشنهادهایی برای تنظیمات مناسب سیستم برای افراد مختلف ارائه نمود.

برای این منظور ابتدا از طریق سعی و خطا، دمای هوای ورودی از دریچه در هر یک از حالات A، B و C به نحوی تنظیم می‌شود که در تمامی این موارد، شرایط استاندارد آسایش حرارتی در محل حضور فرد، بر اساس مدل گایج [۲۰]، برقرار باشد. در فرایند سعی و خطا در هر بار مقدار خاصی برای شرط مرزی دمایی در محل دریچه اعمال شده و با حل معادلات ممنتوم و انرژی، مقادیر میدان سرعت و دما محاسبه می‌شود. به این ترتیب، مقادیر سرعت و دما در محل حضور فرد مشخص شده و با استفاده از آن‌ها احساس حرارتی محاسبه می‌شود.

مقاومت حرارتی مربوط به پوشش فرد (I_{cl}) بر اساس نتایج تحقیق لین و دنگ [۳] برابر ۱/۵۷ clo در نظر گرفته شده است. این لباس سراسر بدن به جز مچ دست و پا را در پوشانده و پشت فرد نیز چسبیده به تخت خواب است. نرخ متابولیک فرد در حالت خواب، بر اساس دست‌نامه مبانی اشری [۲۱] برابر با ۰/۷ Met در نظر گرفته شده است. با توجه به ملاحظات مربوط به کاهش مصرف انرژی در تابستان، مقدار دمای هوای ورودی از دریچه در این مرحله به نحوی تنظیم شده است که شاخص *TSENS* در محل حضور فرد در مرز نارضایتی حرارتی یعنی حدود ۰/۵+ باشد.

با توجه به تنظیمات به‌دست آمده، برای دمای هوای ورودی از دریچه در هر یک از حالت‌های A، B و C، عوامل فیزیولوژیکی از جمله جنسیت و وزن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین، برای بررسی شرایط آسایش حرارتی افراد با فیزیک بدنی متفاوت، از معیار شاخص توده بدنی (*BMI*) که شاخصی آماری برای مقایسه وزن و قد

جدول ۱.دسته‌بندی افراد بر اساس شاخص توده بدنی
Table 1. Individual's *BMI* classification

دسته‌بندی	لاغر	دارای تناسب وزنی	دارای اضافه وزن	چاق
بازه *BMI*	کمتر از ۱۸/۵	بین ۱۸/۵ و ۲۵	بین ۲۵ و ۳۰	بیشتر از ۳۵

جدول ۲. دمای هوای ورودی از دریچه و شاخص احساس حرارتی برای ۳ حالت مختلف در شرایط مطلوب آسایش حرارتی
Table 2. Inlet air temperature and thermal sensation for three different cases with proper thermal comfort conditions

حالت	دبی هوای ورودی (لیتر بر ثانیه)	دمای هوای ورودی (درجه سلسیوس)	وضعیت احساس حرارتی ناحیه - *TSENS*	
			گرم‌ترین نقطه	سردترین نقطه
A	۶۰	۲۲/۵۵	سر و پا – ۰/۴۷	شکم – ۰
B	۸۰	۲۴/۳۵	سر – ۰/۴۷	پا – ۰
C	۱۰۰	۲۵/۳۵	سر – ۰/۴۷	پا – ۰/۰۲ -

یک فرد است، استفاده می‌شود.

$$BMI = \frac{m}{l^2} \quad (۱۴)$$

در این رابطه m نشان‌دهنده جرم شخص بر حسب کیلوگرم و l قد شخص بر حسب متر است. بر اساس مطالعات انجام شده، شاخص توده بدنی افراد را به چهار گروه اصلی افراد لاغر، افراد با تناسب وزنی، افراد دارای اضافه وزن و افراد چاق تقسیم می‌نماید. این دسته‌بندی برحسب شاخص توده بدنیدر جدول ۱ ارائه شده است.

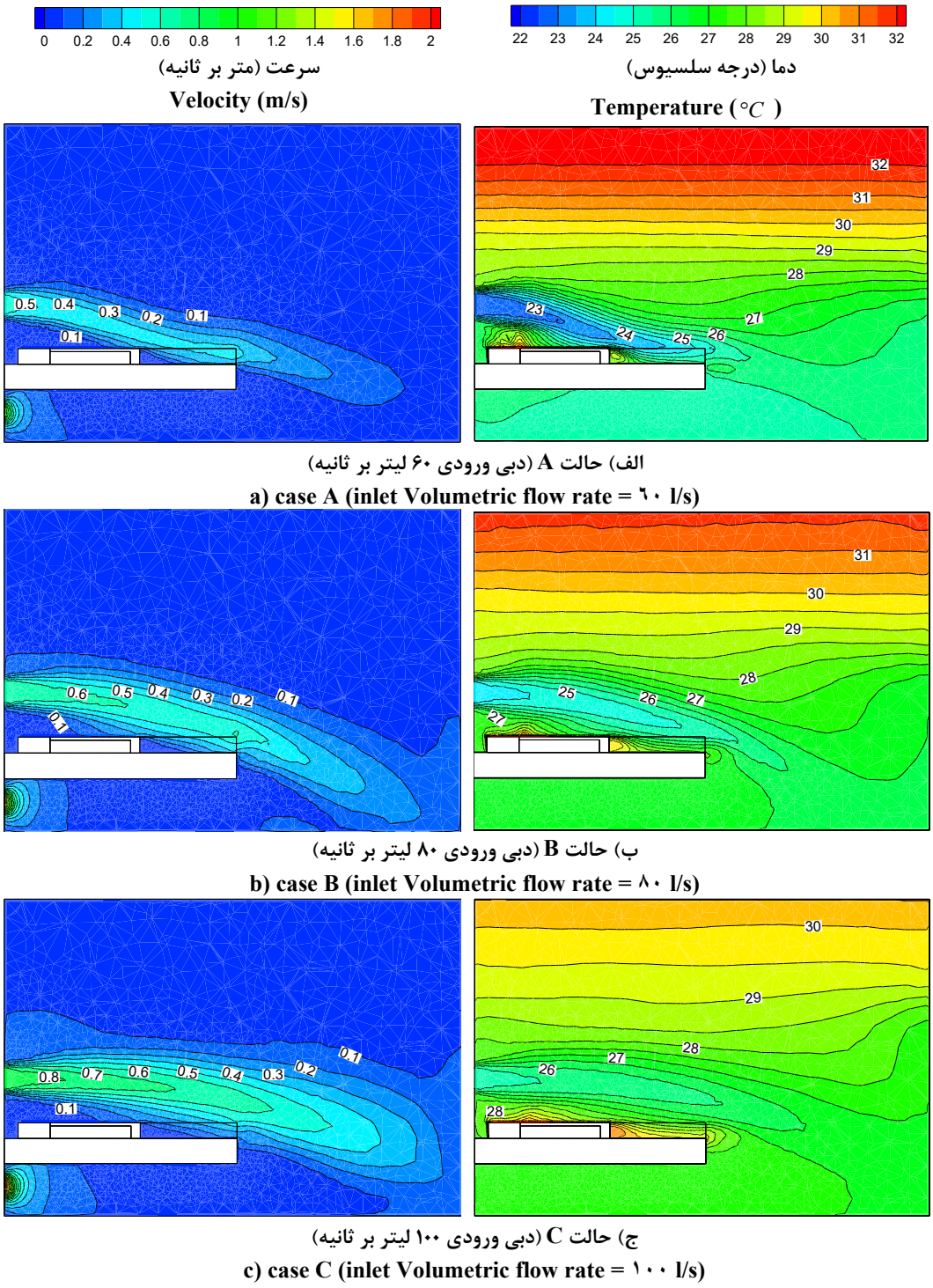
در این تحقیق، برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی فردی، تأثیر دو عامل جنسیت و شاخص توده بدنی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج برای هم زن و هم مرد در سه دسته از افراد دارای تناسب وزنی، چاق و لاغر ارائه می‌شود. شاخص توده بدنی برای معادلات آسایش حرارتی برای افراد لاغر، متناسب و چاق به ترتیب ۱۸، ۲۲/۵ و ۳۳ در نظر گرفته شده است.

۸- نتایج و بحث

همانطور که قبلا اشاره شد، ابتدا دمای دریچه ورودی سیستم تهویه برای سه حالت مختلف به‌گونه‌ای تنظیم شده است که بیشینه شاخص *TSENS* بر اساس مدل گایج استاندارد در حدود مقدار ۰/۵+ قرار بگیرد. دمای به‌دست آمده برای دریچه ورودی در هر یک از این سه حالت و همچنین اطلاعات مربوط به گرم‌ترین و سردترین نقطه در ناحیه حضور فرد در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در شکل ۴ توزیع دما و سرعت هوا، برای سه حالت A، B و C، برای صفحه عبوری از مرکز اتاق ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در حالت A، ناحیه سر و پا به دلیل داشتن سرعت پایین هوا و دمای بالا دارای بیشترین مقدار *TSENS* است و در مرز نارضایتی حرارتی قرار دارد. اما نقاط میانی بدن به دلیل ریزش هوای سرد روی این قسمت‌ها با وجود سرعت پایین هوا دارای احساس حرارتی مطلوب می‌باشند.

نتایج همچنین نشان می‌دهند که در حالت B و C هوای ورودی از دریچه به دلیل داشتن سرعت و دمای بالا در فاصله دورتر از دریچه و روی پای فرد ریزش می‌کند. در این حالت تنها ناحیه سر فرد به دلیل سرعت پایین هوا در مرز نارضایتی حرارتی قرار دارد.

هرچند نتایج به دست آمده در جدول ۲، شرایطی را نشان می‌دهد که بر اساس مدل گایج استاندارد [۲۰] به‌دست آمده است و بر این اساس، افراد با شرایط سنی و جنسیتی مختلف دارای شرایط آسایش حرارتی هستند. در ادامه با استفاده از مدل سه‌نقطه‌ای فردی به تحلیل تاثیر عوامل فردی بر شرایط آسایش حرارتی پرداخته خواهد شد.



شکل ۴. توزیع سرعت و دما در صفحه میانی اتاق در سه حالت مختلف

Fig. 4. Temperature and velocity distribution over longitudinal cross section of the room

احساس حرارتی افراد دارای تناسب وزنی در جدول ۳، احساس حرارتی افراد لاغر در جدول ۴ و احساس حرارتی افراد چاق در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، احساس حرارتی برای بخش‌های پوشیده ($TSENS_{cl}$)، بخش‌های برهنه ($TSENS_{br}$) و کل بدن ($TSENS_{ov}$) نیز گزارش شده است.

در این بررسی نقاط بحرانی، یعنی سردترین و گرمترین نقطه در محل حضور فرد (جدول ۲) مبنای تحلیل قرار گرفته است. با توجه به آنچه گفته شد در حالت A دو عضو برهنه سر و پا به عنوان گرم‌ترین

جدول ۳. احساس حرارتی برای افراد با تناسب وزنی بر اساس مدل سه‌نقطه‌ای فردی

Table 3.Thermal sensation on the basis of individualized 3-node model for normal weight people

جنسیت		حالت A		حالت B		حالت C	
		گرم‌ترین نقطه (سر و پا)	سردترین نقطه (شکم)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)
مرد	$TSENS_{br}$	-۰/۱۷	-۰/۴۴	-۰/۱۶	-۰/۴	-۰/۱۵	-۰/۴
	$TSENS_{cl}$	۰/۵۵	-۰/۰۴	۰/۵۸	-۰/۰۳	۰/۵۸	-۰/۰۳
	$TSENS_{ov}$	۰/۳۴	-۰/۱۵	۰/۳۵	-۰/۱۲	۰/۳۶	-۰/۱۲
زن	$TSENS_{br}$	-۰/۲	-۰/۴۸	-۰/۱۹	-۰/۴۳	-۰/۱۹	-۰/۴۳
	$TSENS_{cl}$	۰/۵۹	-۰/۰۷	۰/۵۹	-۰/۰۸	۰/۵۹	-۰/۰۸
	$TSENS_{ov}$	۰/۴	-۰/۱۸	۰/۳۳	-۰/۱۴	۰/۳۳	-۰/۱۴

جدول ۴. احساس حرارتی برای افراد لاغر بر اساس مدل سه‌نقطه‌ای فردی

Table 4 Thermal sensation on the basis of individualized 3-node model for underweight people

جنسیت		حالت A		حالت B		حالت C	
		گرم‌ترین نقطه (سر و پا)	سردترین نقطه (شکم)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)
مرد	$TSENS_{br}$	-۰/۲۳	-۰/۵۴	-۰/۲۱	-۰/۵۱	-۰/۱۹	-۰.۵
	$TSENS_{cl}$	۰/۲۲	-۰/۱	۰/۳	-۰/۰۹	۰/۳۶	-۰/۰۷
	$TSENS_{ov}$	۰/۱۴	-۰/۲۷	۰/۱۸	-۰/۲	۰/۲۱	-۰/۲۲
زن	$TSENS_{br}$	-۰/۲۷	-۰/۶۳	-۰/۲۳	-۰/۵۸	-۰/۲۱	-۰/۵۸
	$TSENS_{cl}$	۰/۲۶	-۰/۱۵	۰/۳۱	-۰/۱۱	۰/۳۷	-۰/۰۹
	$TSENS_{ov}$	۰/۱۷	-۰/۳۴	۰/۲	-۰/۳	۰/۲۲	-۰/۳۳

نقطه و عضو پوشیده شکم به عنوان سردترین نقطه شناسایی شده است. در حالت B و C هم سر گرم‌ترین نقطه و پا سردترین نقطه می‌باشد.

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقدار شاخص احساس حرارتی به‌دست آمده با استفاده از مدل سه‌نقطه‌ای فردی با مقادیر این شاخص در جدول ۲ تا حدی تفاوت دارد. برای افراد دارای تناسب وزنی، مقدار شاخص احساس حرارتی کلی بدن ($TSENS_{ov}$) برای زن و مرد در سردترین و گرم‌ترین نقطه نسبت به مقادیر این شاخص در جدول ۲ کمتر است. با این حال، اختلاف میان احساس حرارتی کلی در سردترین و گرمترین نقطه ($TSENS_{ov}$) تقریبا با اختلاف شاخص احساس حرارتی در مدل استاندارد گایج برابر است. بنابراین بازه تغییرات احساس حرارتی در دو مدل تفاوت چندانی با هم ندارند.

جدول ۵. احساس حرارتی برای افراد چاق بر اساس مدل سه‌نقطه‌ای فردی
Table 5. Thermal sensation on the basis of individualized 3-node model for overweight people

جنسیت		حالت A		حالت B		حالت C	
		گرم‌ترین نقطه (سر و پا)	سردترین نقطه (شکم)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)	گرم‌ترین نقطه (سر)	سردترین نقطه (پا)
مرد	$TSENS_{br}$	-۰/۰۶	-۰/۱۲	-۰/۰۴	-۰/۱	-۰/۰۱	-۰/۰۸
	$TSENS_{cl}$	۰/۵۸	۰/۱۱	۰/۶	۰/۱۲	۰/۶۲	۰/۱۲
	$TSENS_{ov}$	۰/۴۵	۰	۰/۴۷	۰	۰/۴۹	۰/۰۲
زن	$TSENS_{br}$	-۰/۰۹	-۰/۱۸	-۰/۰۸	-۰/۱۶	-۰/۰۶	-۰/۱۳
	$TSENS_{cl}$	۰/۶۱	۰/۰۹	۰/۶۳	۰/۱	۰/۶۶	۰/۱۱
	$TSENS_{ov}$	۰/۴۷	-۰/۰۵	۰/۴۹	۰/۰۴	۰/۵۳	۰/۰۶

ضمناً در مجموع، مقادیر شاخص احساس حرارتی کل برای افراد با تناسب وزنی در محدوده مجاز قرار می‌گیرد.

مقدار شاخص احساس حرارتی در نقاط پوشیده بدن ($TSENS_{cl}$) در گرم‌ترین نقطه برای افراد متناسب در محدوده‌ای بین ۰/۵۵تا ۰/۵۹ قرار می‌گیرد که از محدوده آسایش حرارتی خارج شده است. بنابراین فرد متناسب در نواحی پوشیده بدن احساس گرما می‌کند و در این مورد تفاوت چندانی بین زن و مرد وجود ندارد. می‌توان نتیجه گرفت که در حالت A بخش‌های پوشیده پا در زنان و مردان دچار احساس گرما هستند. همچنین، مقدار شاخص احساس حرارتی در نقاط برهنه ($TSENS_{br}$) در سردترین نقطه برای فرد سالم در محدوده‌ای بین ۰/۴- تا ۰/۴۸- قرار می‌گیرد و در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد. نکته قابل توجه این است که در این وضعیت مقدار شاخص در تمامی حالت‌ها برای زنان کمتر از مردان می‌باشد. بنابراین زنان نسبت به شرایط سرما حساس‌تر هستند که این با نتایج تحقیق لین و دنگ [۳] سازگار است. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با توجه به نزدیک بودن شرایط حرارتی محیط به حالت خنثی از نظر احساس حرارتی، برای افراد متناسب تفاوت میان احساس حرارتی زنان و مردان کم بوده و از ۰/۰۵ فراتر نمی‌رود.

در مجموع با وجود این‌که فرد بر اساس مدل استاندارد گایج، در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد؛ اما بر اساس مدل سه‌نقطه‌ای فردی شده، افراد با تناسب وزنی در برخی از نقاط پوشیده بدن احساس گرما می‌کنند. همچنین، همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، شاخص $TSENS_{br}$ برای افراد لاغر در سردترین نقاط بین ۰/۵- و ۰/۶۳- قرار دارد که از محدوده مجاز تجاوز کرده است. بنابراین افراد لاغر در قسمت‌های برهنه بدن دچار احساس سرما خواهند بود. بنابراین در حالت‌های B و C نقاط برهنه پای فرد با مقدار شاخص ۰/۵۸-احساس حرارتی نامطلوبی خواهد داشت. اما در حالت A سردترین نقطه بدن یعنی شکم کاملا پوشیده است و فرد احساس نامطلوبی در این ناحیه نخواهد داشت. مقدار شاخص در نواحی پوشیده و همچنین احساس کلی حرارتی برای تمامی حالت‌ها در محدوده مجاز قرار دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که برای افراد لاغر مقادیر تمامی شاخص‌ها کمتر از افراد با تناسب وزنی است. علت این موضوع کم بودن مقاومت و ظرفیت حرارتی بدن این افراد نسبت به افراد با تناسب وزنی است. همچنین طبق جدول ۵، برای افراد چاق مقدار $TSENS_{cl}$ در گرم‌ترین نقاط برای زنان و مردان بین ۰/۵۸ و ۰/۶۶ قرار دارند که از محدوده مجاز فراتر رفته است. بنابراین این افراد در نقاط پوشیده بدن احساس گرما خواهند داشت. البته شاخص کلی احساس حرارتی افراد، در این حالت‌ها به محدوده مجاز نزدیک است.

همانگونه که مشاهده شد، مقادیر شاخص آسایش حرارتی در یک بازه گسترده برای نقاط سرد و گرم در حالات مختلف تغییر

کرده است. برای مثال، در بحرانی‌ترین حالت اختلاف $TSENS_{ov}$ برای گرم‌ترین و سردترین نقطه به مقدار ۰/۵۵ می‌رسد. البته در سیستم تهویه متمرکز، وجود گرادیان‌های نسبتاً شدید دما و سرعت و در نتیجه تفاوت زیاد شرایط حرارتی بین نقاط گرم و سرد، در ایجاد این شرایط دخیل بوده است. از سوی دیگر با توجه به این‌که شرایط ورودی بر اساس مدل گایج با $TSENS$ برابر با ۰/۵ انتخاب شده است مشاهده می‌شود که این مقدار برای افراد لاغر و متناسب وزنی در مدل سه‌نقطه‌ای فردی متفاوت بوده و برای این حالات مقدار $TSENS_{ov}$ از عدد ۰/۵ کمتر شده است. این تفاوت که در بیشترین حالت خود تا ۰/۳۶ واحد احساس حرارتی کلی را تغییر داده است بسیار قابل توجه بوده و اهمیت استفاده از مدل‌های پیشرفته در بررسی آسایش حرارتی برای دست‌یابی به شرایط نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهد.

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تاثیر عوامل فردی بر احساس حرارتی افراد هنگام خواب در شرایط استفاده از یک سیستم تهویه متمرکز بررسی شد. برای این منظور، ابتدا به شیوه سعی و خطا دمای هوای ورودی از دریچه به نحوی تنظیم شد که شرایط مطلوب آسایش حرارتی بر اساس مدل گایج استاندارد در محل حضور فرد فراهم شود ($TSENS$=۰/۵) . سپس از مدل سه‌نقطه‌ای فردی شده برای ارزیابی احساس حرارتی افراد با جنسیت و شاخص توده بدنی مختلف استفاده شد.

نتایج نشان می‌دهد که با وجود این‌که سیستم تهویه مورد نظر بر اساس مدل استاندارد گایج شرایط مطلوب حرارتی را تامین می‌کند، اما افراد با وزن و جنسیت‌های مختلف در برخی موارد دارای احساس حرارتی نامطلوبی هستند.

همچنین در تمامی حالات مورد بررسی، زنان نسبت به مردان احساس سرمای بیشتری دارند؛ ضمن این‌که افراد لاغر نسبت به افراد چاق در شرایط سرما دارای احساس حرارتی نامطلوب‌تری هستند. همچنین، شرایط حرارتی ایجاد شده به گونه‌ای است که افراد با تناسب وزنی و همچنین افراد چاق در حالات مختلف تنظیم سیستم تهویه متمرکز، در نقاط پوشیده بدن احساس گرما و افراد لاغر، به خصوص زنان در نقاط بدون پوشش بدن احساس سرما می‌کنند.

علاوه بر این، بازه گسترده تغییرات شاخص احساس حرارتی که از مقدار ۰/۶۳- تا ۰/۶۶ برای جنسیت و وزن‌های مختلف در تغییر بوده و در موارد متعددی نیز از بازه آسایش حرارتی فراتر رفته است، نشان می‌دهد که تنظیمات سیستم تهویه متمرکز باید متناسب با ویژگی‌های فیزیولوژیکی فردی تنظیم شود تا امکان استفاده موثرتر از آن فراهم شود.

فهرست علائم

A	سطح بدن (m^2)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
I	مقاومت حرارتی (clo)
M	نرخ متابولیک (Wm^{-2})
P	فشار (Pa)
Q	تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح (Wm^{-2})
S	نیروهای حجمی ($kgm^{-2}s^{-2}$)
T	دما (K)
$TSENS$	شاخص احساس حرارتی (بی‌بعد)
V	سرعت (ms^{-1})
W	کار خارجی (Wm^{-2})

علائم یونانی

α	ضریب نفوذ جرمی (kgm^{-3})
β	ضریب انبساط حجمی (K^{-1})
η	بازده (بی‌بعد)
λ	نسبت سطح بخش‌های برهنه بدن به سطح کل بدن (بی‌بعد)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)

زیرنویس‌ها

b	مربوط به بدن
br	برهنه
c	سرد

A	سطح بدن (m^2)
cl	لباس
conv	جابه‌جایی
cr	مرکز بدن
eff	مؤثر
evap	تبخیری
h	گرم
ov	کلی
rad	تابشی
ref	مرجع
res	تنفسی
sk	پوست
t	اغتشاشی

مراجع

[1] A. Hobson, Sleep Scientific American, Inc., New York, (1989)

[2] P. Dongmei, D. Shiming, L. Zhongping, C. Ming-yin, Air-conditioning for sleeping environments in tropics and/or sub-tropics–A review, Energy, 51 (2013) 18-26.

[3] Z. Lin, S. Deng, A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics, Building and Environment, 43(5) (2008) 905-916.

[4] Z. Lin, S. Deng, A questionnaire survey on sleeping thermal environment and bedroom air conditioning in high-rise residences in Hong Kong, Energy and Buildings, 38(11) (2006) 1302-1307.

[5] F. Bauman, E.A. Arens, Task/ambient conditioning systems: engineering and application guidelines, Center for Environmental Design Research, University of California, Berkeley, (1996)

[6] F. Bauman, H. Zhang, E.A. Arens, C. Benton, Localized comfort control with a desktop task conditioning system: laboratory and field measurements, ASHRAE Transactions, 99 (1993)

[7] R. Shute, Integrated access floor HVAC: lessons learned, 0001-2505, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA (United States), (1995)

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

[9] M. Ning, P. Dongmei, C. Mingyin, D. Shiming, Experimental and numerical studies on the performance evaluation of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system, Applied energy, 136 (2014) 956-967.

[10] N. Mao, D. Pan, M. Chan, S. Deng, Performance evaluation of an air conditioning system with different heights of supply outlet applied to a sleeping environment, Energy and buildings, 77 (2014) 281-291.

[11] N. Mao, D. Pan, S. Deng, M. Chan, Thermal, ventilation and energy saving performance evaluations of a ductless bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system, Energy and Buildings, 66 (2013) 297-305.

[12] N. Mao, M. Song, S. Deng, D. Pan, S. Chen, Experimental and numerical study on air flow and moisture transport in sleeping environments with a task/ambient air conditioning (TAC) system, Energy and Buildings, 133 (2016) 596-604.

[13] A. Zolfaghari, A. Foadaddini, M. Hooshmand, Performance analysis of task/ambient air conditioning system for providing the thermal comfort conditions during sleep, Modares Mechanical Engineering, 15(10) (2015) 302-310, (in persian).

[14] N. Mao, D. Pan, Z. Li, Y. Xu, M. Song, S. Deng, A numerical study on influences of building envelope heat gain on operating performances of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system in energy saving and thermal comfort, Applied energy, 192 (2017) 213-221.

[15] P.O. Fanger, Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press, (1970)

[16] H. Zhang, Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments, Center

for the built environment, (2003)

[17] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing, Building and Environment, 45(3) (2010) 776-783.

[18] F. Davoodi, H. Hasanzadeh, S.A. Zolfaghari, M. Marefat, Developing three-node model to estimate individual characteristics effects on thermal sensation and human body thermoregulation, Modares Mechanical Engineering, 16(8) (2016) 149-158, (in persian).

[19] G. Eknoyan, A. Quetelet, the average man and indices of obesity, Nephrology Dialysis Transplantation, 23(1) (2008) 47-51.

[20] A.P. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Transactions, 92 (1986)

[21] ASHRAE, ASHRAE Handbook of Fundamentals, ed Atlanta: ASHRAE, (2009)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Foadaddini, F. Davoodi, S.M. Hooshmand, S.A. zolfaghari, H. Hassanzadeh ,Effect of gender and body fitness on thermal sensation of sleeping occupants under task-ambient air conditioning system, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 453-466.

DOI: 10.22060/mej.2019.15664.6178

این صفحه عمداً خالی است