مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1396، دوره 17، شماره 2، ص‌ص 275-283

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی تأثیرات عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد مستقر در یک محیط پرجمعیت

مهدی افضلیان[1]، فرزین داودی[2]، حسن حسن‌زاده[3]، سیدعلیرضا ذوالفقاری[3*]، مهدی معرفت[4]

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
4- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* بیرجند، صندوق‌پستی 97175/376، zolfaghari@birjand.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 01 آذر 1395
پذیرش: 02 بهمن 1395
ارائه در سایت: 25 بهمن 1395

*کلید واژگان:*
مکان پرجمعیت
مدل سه نقطه‌ای آسایش حرارتی انفرادی
تهویه جابه‌جایی

**چکیده**

ارزیابی صحیح شرایط آسایش حرارتی در مکان‌های پرجمعیت می‌تواند گامی مؤثر در انتخاب و طراحی سیستم‌های تهویه مطلوب در این مکان‌ها باشد. در یک محیط پر جمعیت به دلیل حضور هم‌زمان تعداد زیادی از افراد و نیز تفاوت‌های فردی از جمله سن، جنسیت، لباس، وزن و شاخص توده بدنی تأمین کردن شرایط مطلوب آسایش حرارتی کاری به نسبت پیچیده است. در این مقاله با استفاده از مدل فردی سه نقطه‌ای به تحلیل اثرات عوامل فردی بر احساس حرارتی افراد در یک سالن پرجمعیت پرداخته شده است. برای این منظور یک محیط پر جمعیت دارای سیستم تهویه جابه‌جایی و دریچه‌های ورودی هوای مستقر روی کف مدل‌سازی شده و شاخص احساس حرارتی ساکنان مستقر در ردیف وسط تحلیل شده است. براساس نتایج، زنان در مقایسه با مردان نسبت به شرایط سرما حساس‌تر هستند، همچنین تأثیر شاخص توده بدنی بر احساس حرارتی افراد بسیار قابل ملاحظه است. در مقایسه با یک فرد با اندام متعادل، افراد لاغر دارای احساس حرارتی سردتر و افراد چاق دارای احساس گرم‌تر هستند. به‌عنوان نمونه تفاوت در احساس حرارتی بخش‌های فاقد پوشش برای یک زن لاغر (BMI=18) و یک مرد چاق (BMI=34) در سالن مورد بررسی، حدود 0.42 واحد که در ارزیابی آسایش حرارتی بسیار قابل توجه است.

# Investigating the individual characteristics effects on thermal comfort conditions of occupants in a dense occupancy environment

**Mahdi Afzalian[1], Farzin Davoodi[1], Hasan Hasanzadeh[1], Seyed Alireza Zolfaghari[1*], Mehdi Maerefat[2]**

1- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 21 November 2016
Accepted 21 January 2017
Available Online 13 February 2017

*Keywords:*
Dense occupancy environment
Individual three-node thermal comfort model
Displacement ventilation

**ABSTRACT**

Thermal sensation evaluation of occupants in a dense occupancy space can be an effective step for designing ventilation systems of these environments. In a dense occupancy environment, because of the presence of a large population and also differences in personal parameters such as age, gender, clothing, weight, and body mass index, providing the appropriate thermal comfort conditions is complicated. In this study, the individual characteristics effects on thermal comfort conditions of occupants in a dense occupancy environment are investigated by individualized three-node model. For this issue, a dense occupancy environment with displacement ventilation and inlet air diffusers on the floor is modeled and thermal sensation index for occupants who are seated in middle row has been analyzed. Based on the results, the women are more sensitive than men under cold conditions. Also, effects of mass body index on thermal sensation are significantly noticeable. Compared with a healthy person, the thinner people have a cold sensation and fatter ones feel warmer. For example, in the mentioned case, difference between thermal sensation index of a thin woman and an obese man is 0.42 for the bare parts of the body, indicating noticeable effects on thermal sensation.

## 1- مقدمه

تهویه ساختمان‌ها به دلیل نیاز به بهبود کیفیت هوای داخل و تأمین شرایط مطلوب آسایش حرارتی برای ساکنان امری ضروری است [1]. از سویی باید سیستم تهویه متناسب با فضا و کاربری آن انتخاب شود، چرا که نوع سیستم مورد استفاده تأثیر بسیاری بر کیفیت هوای داخل، آسایش حرارتی، مصرف انرژی و هزینه ساخت فضا دارد [3,2]. مکان‌هایی مانند تالار اجتماعات، سالن سینما و تئاتر فضاهایی هستند که جمعیت زیادی هم‌زمان و به تناوب در آن‌جا حضور دارند؛ بنابراین داشتن تهویه مناسب و تأمین شرایط آسایش حرارتی قابل قبول برای تمام افراد حاضر بسیار دشوار است. در این مکان‌ها تأمین شرایط مطلوب آسایش حرارتی برای جمعیت زیاد و همچنین کیفیت هوای داخل به دلیل حضور افراد برای مدت زمان به نسبت طولانی، تعرق زیاد، تولید دی‌اکسیدکربن ناشی از تنفس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**

M. Afzalian, F. Davoodi, H. Hasanzadeh, S. A. Zolfaghari, M. Maerefat, Investigating the individual characteristics effects on thermal comfort conditions of occupants in a dense occupancy environment, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 275-283, 2017 (in Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

بنابراین سیستم تهویه‌ای مورد استفاده باید دارای ویژگی‌هایی مطابق با شرایط خاص این مکان‌ها باشد. سیستم تهویه جابه‌جایی[1] از سیستم‌های تهویه مکانیکی مناسب برای این مکان‌هاست [4]. در این سیستم مطابق شکل 1 هوا با سرعت کم و دمای مناسب از دریچه‌های کف یا نزدیک به کف وارد فضا شده و هوای آلوده و مرطوب از دریچه‌های واقع در سقف خارج می‌شوند [6,5]. در این سیستم تهویه هوای تمیز مستقیماً وارد ناحیه حضور افراد[2] شده و بدون اختلاط از فضا خارج می‌شود، بنابراین هوای محل حضور افراد از کیفیت بسیار مطلوب برخوردار است [8,7]

تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص بررسی عملکرد سیستم‌های تهویه جابه‌جایی در مکان‌های پرجمعیت انجام شده است. چئونگ و همکاران در سال 2003 [9] به تحلیل آسایش حرارتی یک تالار اجتماعات در اقلیم گرمسیری پرداختند. در این تحقیق به دو صورت پیمایش میدانی و تحلیل عددی شرایط یک تالار اجتماعات از نظر سرعت، دما و رطوبت نسبی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. لائو و چن در سال 2007 [10] سیستم تهویه جابه‌جایی در یک مکان پر جمعیت با دو نوع ورودی مستقیم و چرخشی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوی جریان ایجاد شده توسط این نوع سیستم تهویه در ناحیه حضور افراد سبب کاهش میزان آلاینده‌ها می‌شود، ولی نارضایتی حرارتی موضعی[3] ناشی از کوران[4] و گرادیان عمودی دما[5] در این سیستم‌ها با وجود کیفیت مطلوب هوا در این محیط محتمل است، همچنین ورودی چرخشی شرایط مطلوب‌تری از نظر شرایط آسایش حرارتی ایجاد می‌کند [10]. کاسون و همکاران در سال 2010 [11] به صورت تجربی به تحلیل سیستم تهویه جابه‌جایی از نقطه نظر گرمایش، سرمایش و الزامات و شرایط آن پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که سیستم تهویه جابه‌جایی شرایط مطلوبی از نظر گرمایش، سرمایش و آسایش حرارتی ایجاد کرده و کارآیی تهویه بالایی دارد. کیم و همکاران در سال 2013 [3] به بررسی نقش سرعت هوا و محل دریچه‌های ورودی بر آسایش حرارتی، توزیع سرعت و دما در یک سالن تئاتر پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که محل استقرار دریچه‌های ورودی هوا نقش مهمی در توزیع دما و سرعت جریان هوا در ناحیه حضور افراد دارد. فتح‌الزاده و همکاران [12] در تحقیقی در سال 2015 به بررسی ارتفاع دریچه‌های خروجی یک مکان پرجمعیت بر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل برای دو نوع دریچه ورودی مستقیم و چرخشی پرداختند. دریچه خروجی نزدیک به کف براساس تحقیقات ایشان از لحاظ آسایش حرارتی، مصرف انرژی و کیفیت هوای داخل بدترین حالت هستند. نادا و همکاران در سال 2016 [13] به کمک یک تحلیل عددی به بررسی توزیع دما، سرعت و آسایش حرارتی در یک سالن تئاتر پرداختند. در این تحقیق تأثیر عواملی مانند سرعت و دمای هوای ورودی، تعداد دریچه‌های ورودی در کف و ارتفاع ساختمان بر آسایش حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت. فتح‌الزاده و همکاران در سال 2016 [14] در پژوهشی شرایط عملکردی سیستم توزیع هوای زیر سطحی را در یک مکان پرجمعیت مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق دو نوع دریچه (مقابل و زیر صندلی) و با سرعت‌های مختلف ورودی بررسی شد و از لحاظ آسایش حرارتی، عمر متوسط هوا[6] و نارضایتی حرارتی موضعی مورد تحلیل قرار گرفت. براساس نتایج به‌دست‌آمده در شرایط یکسان از نظر دما و سرعت هوای ورودی، برای دریچه‌های زیر صندلی گرادیان عمودی دمای بیشتری رخ می‌دهد، ولی از نظر کیفیت هوای داخل تفاوت چشمگیری مشاهده نشد.

همان‌طور که اشاره شد تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در مورد عملکرد سیستم‌های تهویه جابه‌جایی در مکان‌های پرجمعیت انجام شده است. در همه موارد، از مدل‌های آسایش حرارتی ساده و غیر انفرادی مانند مدل فنگر[7] استفاده شده، و به بیان دیگر تأثیر خصوصیات فردی افراد حاضر در محیط‌های پر جمعیت بر آسایش حرارتی ایشان در نظر گرفته نشده است. از آن‌جایی که افرادی با تفاوت‌های فردی و جنسیتی در این مکان‌ها حاضر هستند، استفاده از مدل‌های آسایش حرارتی فردی می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. با توجه به تفاوت‌های فردی افراد حاضر در مکان‌های پر جمعیت، بررسی میزان تأثیرگذاری عوامل فردی بر شرایط طراحی سیستم‌های تهویه بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند به‌عنوان یکی از موضوعات جذاب و کاربردی مطرح شود. بر این اساس استفاده از مدل‌های آسایش حرارتی انفرادی[8] در بررسی شرایط حرارتی مطلوب در مکان‌های پر جمعیت باید مورد توجه قرار گیرد. تفاوت‌های فیزیولوژیکی افراد مختلف مانند وزن، قد، جنسیت، سن و متابولیک پایه می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنظیم حرارتی بدن و در نتیجه بر شاخص احساس حرارتی افراد داشته باشد. از سوی دیگر استفاده از مدل‌های حرارتی بدن که برای جمعیت‌های گسترده انسانی توسعه یافته است، برای اشخاص لزوماً منتج به جواب دقیقی نمی‌شود. یکی از اساسی‌ترین ضعف‌های مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی رویکرد ساده آن‌ها در مدل‌سازی لباس است؛ بنابراین ذوالفقاری و معرفت [15] با ایجاد اصلاحاتی در مدل گایج این اشکالات را برطرف کرده و در نتیجه مدل سه نقطه‌ای (قسمت برهنه پوست، قسمت پوشیده پوست و مرکز بدن) را ارائه کردند، سپس در ادامه تحقیق آن‌ها داودی و همکاران [16] مدل سه نقطه‌ای را به مدلی فردی که عواملی چون سن، جنسیت، شاخص توده بدنی[9] و متابولیک پایه مورد نظر قرار گرفته شد توسعه دادند و در نهایت این مدل با استفاده از نتایج تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد مستقر در یک مکان پرجمعیت با استفاده از مدل انفرادی سه نقطه‌ای است. در این مقاله ابتدا به معرفی فضای نمونه مورد مطالعه، ابزار تحقیق و معادلات حاکم بر مسئله پرداخته می‌شود. پس از آن اعتبارسنجی حلگر مورد استفاده و استقلال از شبکه بررسی شده است. در نهایت نتایج و بحث پیرامون آن همراه توصیه‌های مفید و کاربردی ارائه می‌شود.

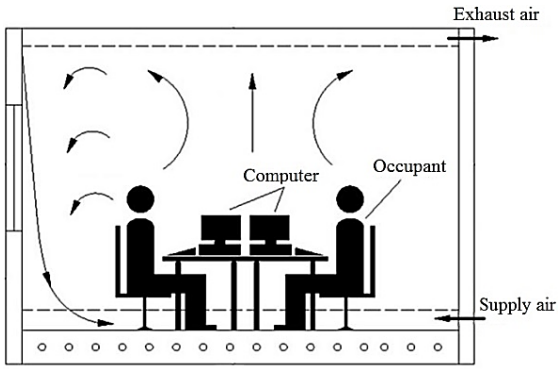



**Fig. 1** A room with displacement ventilation [6]

**شکل 1** یک اتاق با سیستم تهویه جابه‌جایی [6]

[1] Displacement Ventilation
[2] Occupied zone
[3] Local Thermal Discomfort
[4] Draught discomfort
[5] Vertical Temperature Gradient
[6] Mean Age of Air
[7] Fanger
[8] Individual Thermal comfort model
[9] Body Mass Index (BMI)



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

## 2- فضای نمونه

در این تحقیق یک سالن به طول 6m، عرض 7.6m و ارتفاع متوسط 5.4m مورد بررسی قرار گرفته است. از آن‌جایی که شرایط حرارتی سالن نسبت به صفحه میانی کاملاً متقارن است، مطابق شکل 2 نصف سالن به‌عنوان فضای نمونه در نظر گرفته شده است. بر این اساس ابعاد فضای نمونه شامل طول 6 m ، عرض 3.8m و ارتفاع بین 4.8m-6 است که چیدمان صندلی‌ها در آن پلکانی و تعداد افراد حاضر در نصف سالن 25 نفر است که در 5 ردیف 5 نفره قرار گرفته‌اند. هوا مطابق شکل 2 توسط 5 دریچه نواری واقع در زیر صندلی‌ها وارد سالن شده و توسط یک دریچه مدور به قطر 0.2m از سقف خارج می‌شود. هوای ورودی مستقیم، بدون چرخش و سرعت 0.3m/s وارد سالن شده، و هوا 9 مرتبه در ساعت طبق الزامات مبحث 14 مقرارت ملی ساختمان تعویض می‌شود. با توجه به تقارن فضای نمونه دیوار سمت چپ به عنوان صفحه تقارن و بقیه دیوارها به عنوان دیوار داخلی درنظر گرفته شده است.

افراد حاضر در سالن با هندسه‌ای ساده و نزدیک به واقع مدل‌سازی شده است. برای افراد در سالن از شرط مرزی حرارتی شار ثابت با نرخ متابولیک افراد نشسته و در حال یک فعالیت معمول برابر با 1met و یا $58.15W/m^2$ استفاده شده است. رطوبت نسبی فضا 50% و مقاومت پوشش لباس افراد براساس پوشش رسمی و متداول این مکان‌ها مانند کت و شلوار برابر 1clo فرض شده است.

جهت بررسی شرایط آسایش حرارتی افراد در فضای نمونه، ابتدا شبیه‌سازی عددی جریان هوا انجام و سپس محیط به مدت 240 دقیقه از لحاظ احساس حرارتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور بررسی نقش شاخص توده بدنی یا همان تناسب اندام بر تعیین احساس حرارتی افراد، در دو مرحله مجزا برای زنان و مردان، به گونه‌ای این افراد انتخاب شده‌اند که در سه گروه متفاوت شاخص توده بدنی از لحاظ ترکیب فیزیکی متفاوت (بسیار لاغر، تناسب وزنی، بسیار چاق) قرار گرفته‌اند. در جدول 1 خصوصیات افراد مورد مطالعه و همچنین کمیت‌های میزان چربی، ظرفیت گرمایی بافت و ضخامت لایه چربی زیر پوستی فرد که با استفاده از عوامل فردی مستقل در کد محاسبه می‌شود، آورده شده است. شاخص توده بدنی سنجشی آماری برای مقایسه وزن و قد یک فرد بوده [17]و معیاری معتبر برای تفکیک افراد از لحاظ فیزیک بدنی است که از رابطه (1) به‌دست می‌آید. جرم فرد بر حسب کیلوگرم و قد براساس متر است.

$$BMI = \frac{m}{l^2} \quad (1)$$

**جدول 1** مشخصه‌های انفرادی افراد تحت آزمایش

**Table 1** Individual characteristic of subjects

| مشخصه | مرد لاغر | زن لاغر | مرد متناسب | زن متناسب | مرد چاق | زن چاق |
|---|---|---|---|---|---|---|
| توده بدنی ($kg/m^2$) | 18 | | 22.5 | | 33 | |
| سن (years) | 30 | | 30 | | 30 | |
| وزن (kg) | 45 | | 65 | | 110 | |
| قد (m) | 1.58 | | 1.7 | | 1.8 | |
| مساحت بدن ($m^2$) | 1.4 | | 1.74 | | 2.2 | |
| گرمای ویژه (J/kgK) | 3526 | 3388 | 3458 | 3326 | 3284 | 3168 |
| ضخامت چربی (mm) | 6.98 | 8.2 | 10.2 | 10.8 | 15.8 | 18.5 |
| درصد چربی بدن (%) | 10.8 | 22.1 | 16.8 | 28.3 | 32.03 | 39.2 |

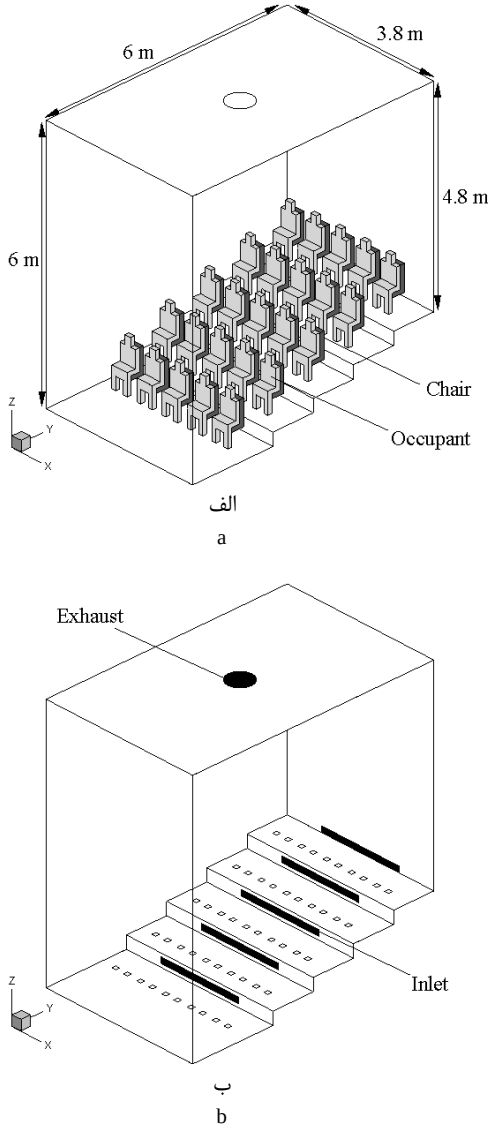



**Fig. 2** Schematic of sample dense occupancy environment, a- seating arrangement in the hall, b- location of inlet and exhaust diffusers

**شکل 2** طرحواره فضای پرجمعیت نمونه، الف- آرایش نشستن در سالن، ب- موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی

## 3- ابزار تحقیق و معادلات حاکم

### 3-1- ابزار تحقیق

در تحقیق حاضر برای رسم هندسه و شبکه‌بندی از نرم‌افزار کمکی سالوم[1] استفاده و شبکه‌بندی سازمان‌نیافته ایجاد شده است، سپس برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم از حلگر عددی اپن‌فوم[2] و بسته حل بویانت بوزینسک سیمپل فوم[3] استفاده شده است. حلگر یادشده برای حل عددی از روش حجم محدود استفاده می‌کند. در این حلگر از تقریب بوزینسک[4] برای در نظر گرفتن اثرات جابه‌جایی طبیعی در معادله جریان و از الگوریتم سیمپل[5] برای تصحیح جفت‌شدگی بین فشار و سرعت استفاده شده است. در در نهایت با استفاده از کد مدل فردی سه نقطه‌ای، احساس حرارتی افراد با توجه به شرایط محیطی میدانی به‌دست‌آمده محاسبه می‌شود.

[1] Salome
[2] Open Foam
[3] BuoyantBoussinesqSimpleFoam
[4] Boussinesq approximation
[5] SIMPLE



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

### 3-2- معادلات حاکم بر جریان و انتقال حرارت

معادلات حاکم در این تحقیق شامل معادلات بقاء و معادلات مربوط به احساس حرارتی افراد است.

#### 3-2-1- معادلات جریان و انرژی

در این تحقیق به منظور تحلیل جریان سیال و محاسبه توزیع دما از معادلات پیوستگی، اندازه حرکت خطی و بقای انرژی استفاده شده است. جریان سیال پایا، غیرقابل تراکم و دارای خواص ثابت فرض شده و اثرات شناوری حرارتی از طریق تقریب بوزینسک به معادلات حرکت وارد شده است.

معادله پیوستگی (2) به شرح زیر است.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{2}$$

معادله حرکت سیال (3) به شرح زیر است.

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu_{\text{eff}} \nabla^2 \vec{V} + \vec{S} \tag{3}$$

معادله بقای انرژی (4) به شرح زیر است.

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \alpha_{\text{eff}} \nabla^2 T + S_{\text{T}} \tag{4}$$

همچنین $\vec{s}$ بیان‌گر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک به صورت رابطه (5) محاسبه می‌شود.

$$\vec{s} = \rho \vec{g}[1 - \beta(T - T_{\text{ref}})] \tag{5}$$

که $\beta$ ضریب انبساط حجمی و $\vec{g}$ بردار شتاب جاذبه زمین است، همچنین $\mu_{\text{eff}}$ لزجت موثر سیال که برابر با مجموع لزجت مطلق سیال $\mu$ و لزجت اغتشاشی سیال $\mu_{\text{t}}$ و به صورت رابطه (6) است.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_{\text{t}} \tag{6}$$

لزجت اغتشاشی سیال از مدل دو معادله‌ای $k$-$\varepsilon$ استاندارد محاسبه می‌شود.

#### 3-2-2- معادلات مربوط به تنظیم حرارتی بدن و آسایش حرارتی فردی

در مدل سه نقطه‌ای فردی، بدن انسان بر مبنای یک دیدگاه کل‌نگر به سه بخش پوست لخت، پوست پوشیده و بخش مرکزی تقسیم می‌شود. معادلات موازنه انرژی و همچنین سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت برای هر یک از این بخش‌ها به‌طور مجزا در نظر گرفته می‌شود.

معادلات موازنه انرژی برای هر یک از بخش‌های بدن (مرکز، پوست فاقد پوشش و پوست پوشیده) را می‌توان به صورت روابط (7-9) نوشت.

$$S_{\text{cr}} = M - W - Q_{\text{res}} - \lambda Q_{\text{cr-sk,br}} - (1-\lambda) Q_{\text{cr-sk,cl}} \tag{7}$$

$$S_{\text{sk,br}} = Q_{\text{cr-sk,br}} - (Q_{\text{conv,br}} + Q_{\text{rad,br}} + Q_{\text{evap,br}}) \tag{8}$$

$$S_{\text{sk,cl}} = Q_{\text{Cr-sk,cl}} - (Q_{\text{conv,cl}} + Q_{\text{rad,cl}} + Q_{\text{evap,cl}}) \tag{9}$$

در این معادلات زیرنویس‌های br و cl به ترتیب بیانگر بخش‌های لخت و پوشیده بدن، همچنین $\lambda$ نسبت سطح بخش‌های لخت $A_{\text{br}}$ به سطح کل بدن $A_{\text{D}}$ است.

در نهایت شاخص‌های روابط (10-12) برای ارزیابی احساس حرارتی بخش‌های لخت، پوشیده و کل بدن تعریف شده است [15].

$$TSENS_{\text{br}} = \begin{cases} 0.4685(T_{\text{b,br}} - T_{\text{b,c}}) & , T_{\text{b,br}} < T_{\text{b,c}} \\ 0.47\eta_{\text{e,br}}(T_{\text{b,br}} - T_{\text{b,c}})/(T_{\text{b,h}} - T_{\text{b,c}}) & , T_{\text{b,c}} \le T_{\text{b,br}} \le T_{\text{b,h}} \\ 0.47\eta_{\text{e,br}} + 0.685(T_{\text{b,br}} - T_{\text{b,h}}) & , T_{\text{b,h}} < T_{\text{b,br}} \end{cases} \tag{10}$$

$$TSENS_{\text{cl}} = \begin{cases} 0.4685(T_{\text{b,cl}} - T_{\text{b,c}}) & , T_{\text{b,cl}} < T_{\text{b,c}} \\ 0.47\eta_{\text{e,cl}}(T_{\text{b,cl}} - T_{\text{b,c}})/(T_{\text{b,h}} - T_{\text{b,c}}), & T_{\text{b,c}} \le T_{\text{b,cl}} \le T_{\text{b,h}} \\ 0.47\eta_{\text{e,cl}} + 0.685(T_{\text{b,cl}} - T_{\text{b,h}}) & , T_{\text{b,h}} < T_{\text{b,cl}} \end{cases} \tag{11}$$

$$TSENS_{\text{ov}} = \begin{cases} 0.4685(T_{\text{b}} - T_{\text{b,c}}) & , T_{\text{b}} < T_{\text{b,c}} \\ 0.47\eta_{\text{e}}(T_{\text{b}} - T_{\text{b,c}})/(T_{\text{b,h}} - T_{\text{b,c}}) & , T_{\text{b,c}} \le T_{\text{b}} \le T_{\text{b,h}} \\ 0.47\eta_{\text{e}} + 0.685(T_{\text{b}} - T_{\text{b,h}}) & , T_{\text{b,h}} < T_{\text{b}} \end{cases} \tag{12}$$

خصوصیات فردی مستقل و در دسترس افراد مانند سن، وزن، قد و جنسیت در مدل توسعه‌یافته جدید به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود؛ عوامل فردی تأثیرگذار چون درصد چربی بدن، ظرفیت گرمایی ویژه بدن، مقاومت حرارتی بافت‌های بدن از طریق این خصوصیات محاسبه شده [18] و در معادلات مربوط به موازنه انرژی در مدل سه نقطه‌ای اصلاح می‌شود.

## 4- اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

### 4-1- اعتبارسنجی

به منظور اعتبار سنجی مدل حاضر از نتایج تجربی کوبایاشی [19] برای تهویه یک اتاق استفاده شده است. اتاق مورد نظر مطابق شکل 3 دارای طول 5.16m، عرض 3.65m و ارتفاع 2.27m است. دمای هوای ورودی 19 °$C$ و نرخ تعویض هوا 4.4 مرتبه در ساعت است. شرایط مرزی حرارتی دیوارها و شار گرمایی سایر تجهیزات و افراد به ترتیب در جداول 2 و 3 داده شده است. در شکل 4 نتایج تحقیق کنونی و نتایج تجربی کوبایاشی [19] ترسیم شده که از دقت قابل قبولی برخودار است.

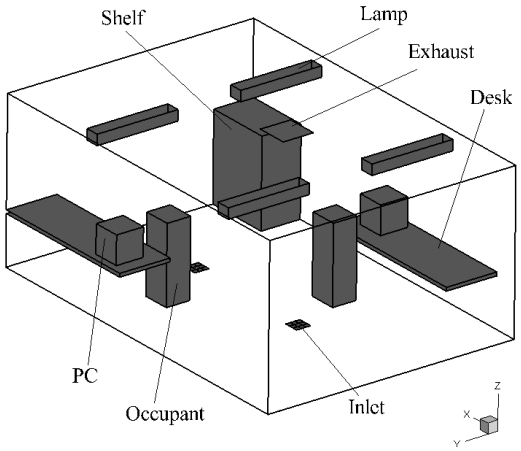



**Fig. 3** Configuration of the case room used for validation [19]

**شکل 3** هندسه اتاق مورد مطالعه برای اعتبارسنجی [19]

**جدول 2** دمای دیوارهای فضای مربوط به اعتبارسنجی

**Table 2** Temperature of walls of the validation case room

| موقعیت دیوار فضا | دما(°C) |
|---|---|
| سقف | 27.4 |
| کف | 25 |
| شمالی | 26.8 |
| جنوبی | 26.8 |
| شرقی | 28.6 |
| غربی | 25.8 |

**جدول 3** شارهای گرمایی ناشی از تجهیزات درون فضای مربوط به اعتبارسنجی

**Table 3** Equipment heat fluxes in the validation case room

| تجهیزات | شار گرمایی(W) |
|---|---|
| لامپ‌های فلوئورسنت | 68 |
| رایانه اول | 108.5 |
| رایانه دوم | 173.4 |
| آدمک حرارتی | 75 |



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

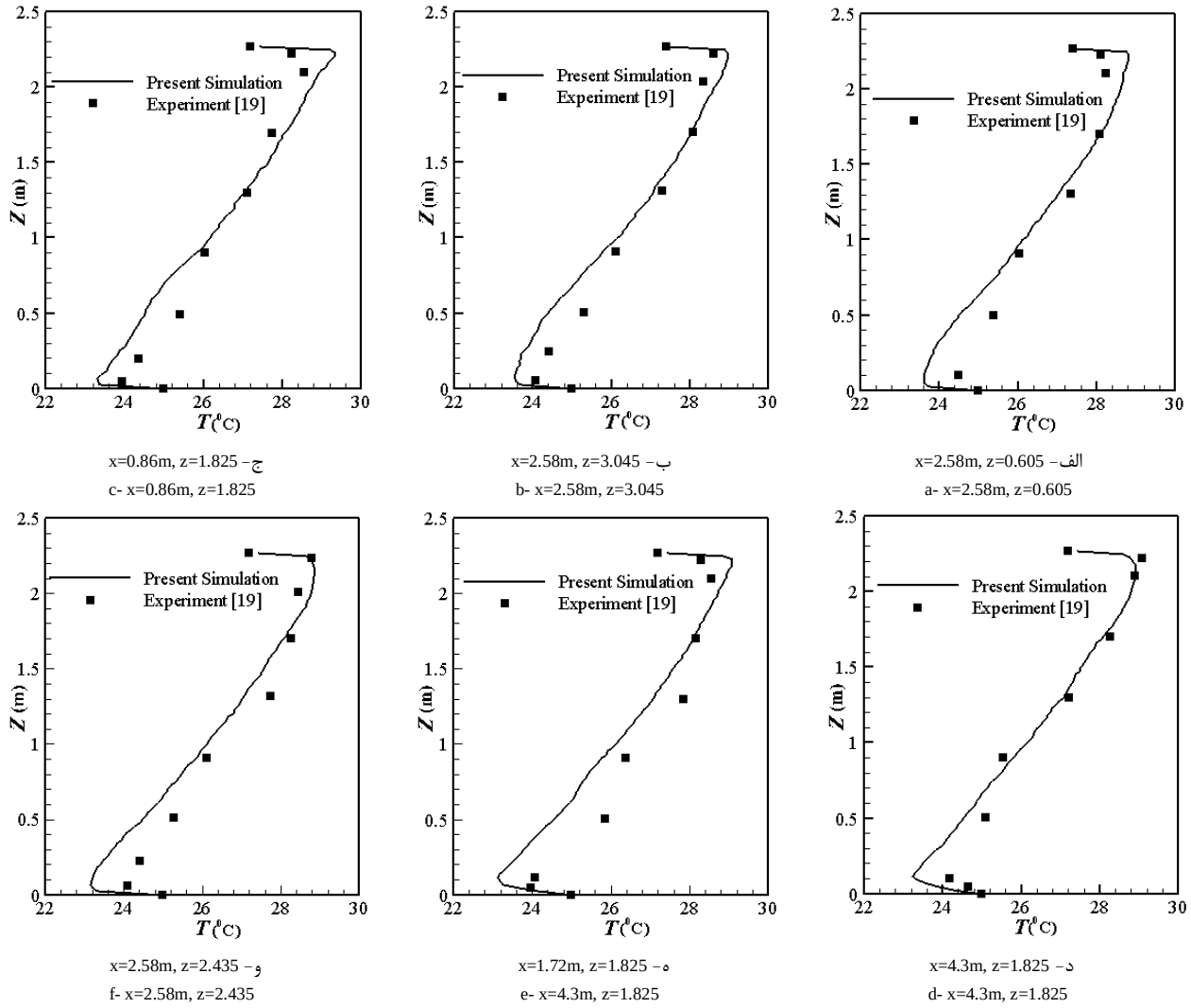



**Fig. 4** Comparison of the measured and simulated air temperature profiles

**شکل 4** مقایسه نتایج شبیه‌سازی توزیع دمای هوا با داده‌های تجربی

### 4-2- استقلال حل از شبکه

برای حل مسئله از یک شبکه غیرسازمان‌یافته استفاده شده است، به‌طوری‌که در نواحی با گرادیان زیاد مانند دریچه‌های ورودی و خروجی هوا و مجاورت منابع گرمایی تراکم شبکه محاسباتی زیادتر است تا اثرات آن‌ها دقیق‌تر وارد میدان حل شوند. برای انتخاب شبکه مناسب لازم است که نخست استقلال حل از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو مسئله برای شبکه‌هایی با تعداد 1325419، 886650 و 2156146 گره مورد بررسی قرار گرفتند. براساس نتایج به‌دست‌آمده به ازای تغییر شبکه از 1325419 گره به 2156146 گره تغییر چندانی در پاسخ‌ها حاصل نشده است؛ بنابراین شبکه با 1325419 گره به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است، همچنین جهت ارزشیابی نتایج و تخمین خطای گسسته‌سازی، از روش شاخص همگرایی شبکه (GCI) استفاده می‌شود. این شاخص در سال 1994 معرفی شد [20]. در واقع شاخص همگرایی شبکه اختلاف پاسخ محاسبه‌شده با جواب عددی تقریبی را نشان می‌دهد. برای بررسی این شاخص در نهایت از فرمول (13) استفاده می‌شود [21].

$$\varphi = \frac{r_{\mathrm{p}}^{12}\mathrm{GCI}_{12}^{\mathrm{fine}}}{\mathrm{GCI}_{23}^{\mathrm{fine}}} \tag{13}$$

برای حصول اطمینان از قرار گرفتن راه حل در محدوده جانبی همگرایی باید $\varphi \cong 1$ را داشته باشیم.

نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش GCI برای سه حالت شبکه‌بندی و مقدار به‌دست‌آمده برای $\varphi$ که برابر 0.99 است، نشان می‌دهند که فواصل گسسته و شبیه‌سازی عددی در محدوده جانبی همگرایی قرار دارند.

## 5- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد هدف از تحقیق کنونی بررسی عوامل فردی بر شرایط آسایش حرارتی افراد حاضر در یک سالن پرجمعیت است، چرا که افراد حاضر در این فضاها معمولاً دارای شرایط متفاوتی از لحاظ پوشش، جنسیت، سن و وضعیت بدنی هستند. جهت تعیین دمای هوای ورودی و شرایط قرارگیری دریچه‌های ورودی، میانگین شاخص آسایش حرارتی (TSENS) در ناحیه حضور افراد برابر با صفر انتخاب شده است. با این مقدار همه افراد با خصوصیات فردی و جنسیتی متفاوت احساس آسایش حرارتی مطلوبی در هر دو فصل سرد و گرم سال خواهند داشت. دمای مطلوب برای هوای ورودی از دریچه‌ها در این شرایط و با استفاده از مدل دو نقطه‌ای گایج و روش سعی و خطا 23℃ تعیین شده است.

حال که به متوسط شاخص احساس حرارتی در ناحیه حضور افراد در



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

شرایط مطلوب قرار دارد، وضعیت تک‌تک افراد با استفاده از مدل انفرادی سه نقطه‌ای بررسی می‌شود. با توجه به نزدیک‌بودن شرایط حرارتی افراد در ردیف‌های مختلف و برای کاهش حجم نتایج گزارش‌شده در مقاله و امکان بهتر تحلیل نتایج، فقط شرایط حرارتی انفرادی برای افراد مستقر در ردیف سوم سالن (5 نفر) که تقریباً در وسط فضای نمونه قرار دارند، مورد بررسی قرار گرفت. شکل 5 جایگاه استقرار افراد را نشان می‌دهد.

در ابتدا میانگین دما و سرعت هوا در محدوده اطراف آن افراد برای محاسبه احساس حرارتی هر شخص در جدول 4 گزارش شده است. همان‌طور که در جدول 4 نشان داده شده دما و سرعت هوای اطراف افراد تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند، که این می‌تواند سبب احساس آسایش حرارتی متفاوتی برای افراد شود، همچنین در شکل 6-الف توزیع سرعت، در شکل 6-ب توزیع دما در این فضا ترسیم شده است. براساس توزیع دمای نشان داده شده، بر اثر حرارت افراد حاضر دمای هوا در ناحیه حضور افراد بالا رفته و این هوای گرم به سمت بالا حرکت کرده و هوای سرد بالا جایگزین می‌شود. به این دلیل سرعت هوا در خارج از ناحیه حضور افراد سرعت بالاتری داشته و در محل دریچه خروجی به بالاترین مقدار خود می‌رسد. در شکل 7 توزیع دما و سرعت بر یک خط در ردیف سوم نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود در جایگاه‌های وسط ردیف سوم به دلیل نزدیکی به دریچه‌های ورود هوا دما و سرعت بالاتر است.

در این تحقیق برای بررسی شرایط آسایش حرارتی فردی از چهار عامل خصوصیات فردی مستقل، دو عامل جنسیت و شاخص توده بدنی (*BMI*) استفاده شده و نتایج برای زن و مرد در سه حالت با تناسب وزنی (18.5<*BMI*<24.9)، افراد چاق (*BMI*>30) و افراد لاغر (*BMI*<18.5) در جدول‌های 5، 6 و 7 گزارش شده است. احساس حرارتی افراد با تناسب وزنی در جدول 5، احساس حرارتی افراد چاق در جدول 6 و احساس حرارتی افراد لاغر در جدول 7 نشان داده شده است. این احساس حرارتی برای بخش پوشیده (TSENScl)، بخش برهنه (TSENSbr) و به صورت کلی (TSENSov) گزارش شده است.

همان‌طور که بیان شد افراد ردیف سوم در شرایط مختلف برای بیان و مقایسه نتایج و درک بهتر تأثیرات عوامل فردی بر شرایط آسایش حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگر زن‌ها از محدوده حالت خنثی خارج شده و شرایط سرد را تجربه کنند نسبت به مردها حساس‌تر که این با نتایج لین و همکاران[17] سازگار است.

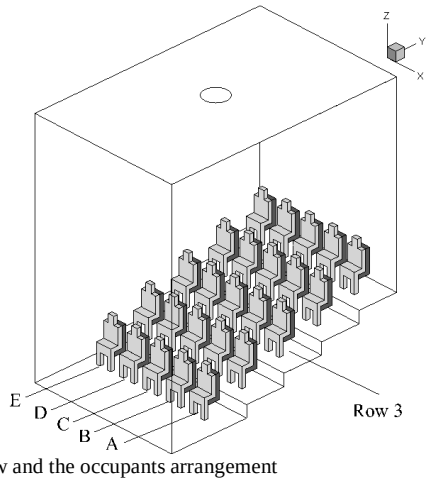
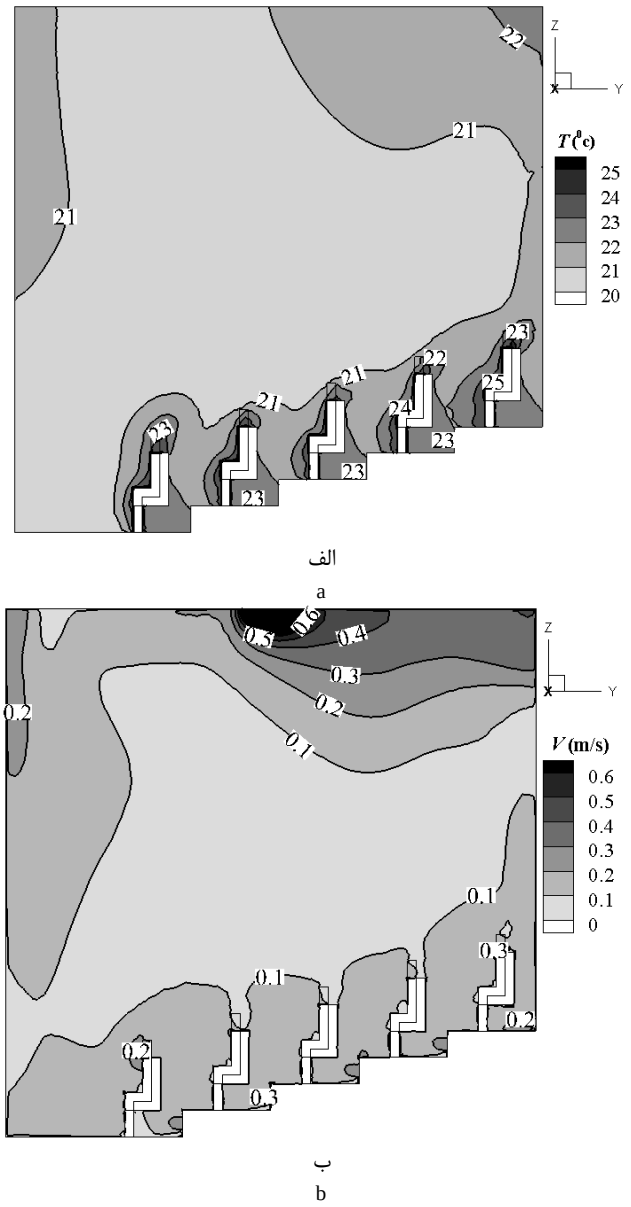



**Fig. 5** Row and the occupants arrangement

**شکل 5** نحوه آرایش ردیف و افراد




الف
a

ب
b

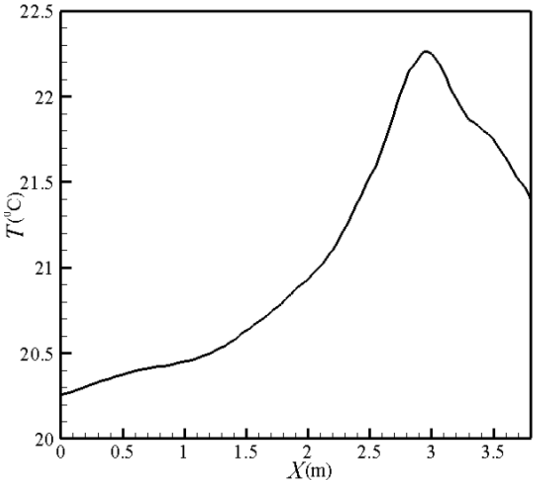
**Fig. 6** Distribution of a- Temperature and b- Velocity in the sample dense occupancy space

**شکل 6** توزیع الف- دما و ب- سرعت در فضای پرجمعیت نمونه

البته از آن‌جایی که در فضای نمونه سعی شده است دمای ورودی به گونه‌ای تنظیم شود که میانگین دمای خنثی در مجاورت فرد ایجاد شود، بسته به جنسیت تفاوت اندکی در احساس حرارتی وجود دارد. بیشترین این اختلاف در حدود 0.1 واحد در احساس حرارتی بین مرد و زن است که در جایگاه E برای افراد لاغر اندام اتفاق می‌افتد، ولی برای افراد با توده‌های بدنی متفاوت تغییرات بیشتری وجود دارد. در مقایسه با یک فرد با تناسب وزنی، هر چه فرد لاغرتر باشد احساس حرارتی فرد به سمت سرما و هر چه فرد چاق‌تر باشد، به سمت گرما متمایل است. مطالعات تجربی نتایج حاضر را تأیید کرده و نشان می‌دهد که افراد چاق نسبت به افراد لاغر در شرایط مواجهه با سرما رفتاری کندتر از خود بروز می‌دهند [22]. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، احساس حرارتی کلی ($TSENS_{ov}$) برای تمام افراد در تمام جایگاه‌ها در محدوده خنثی واقع شده است. احساس حرارتی قسمت پوشیده بدن برای جایگاه A در فرد چاق با فرد لاغر 0.54 واحد اختلاف دارد، یعنی هر فردی

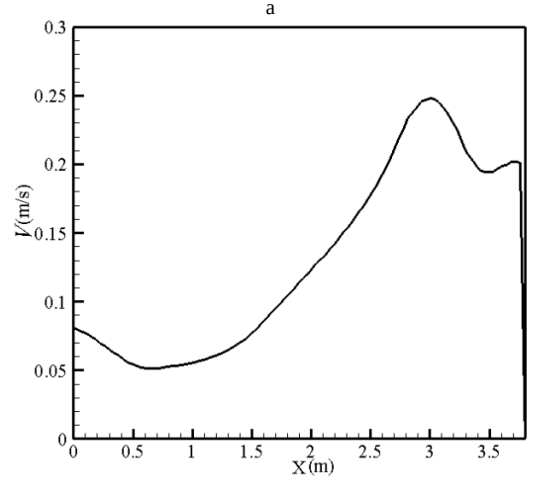


[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]




الف

a




ب

b

**Fig. 7** Distribution of a- Temperature and, b- Velocity over a line at row 3

**شکل 7** توزیع الف- دما، ب سرعت بر روی یک خط در ردیف سوم

**جدول 4** دما و سرعت هوا در اطراف هر فرد در ردیف سوم

**Table 4** Temperature and velocity of air around each occupant

| جایگاه | فرد | دما (°C) | سرعت ($m/s$) |
|---|---|---|---|
| A | 1 | 21.7 | 0.16 |
| B | 2 | 22.7 | 0.15 |
| C | 3 | 22.3 | 0.12 |
| D | 4 | 21.3 | 0.07 |
| E | 5 | 20.8 | 0.05 |

**جدول 5** احساس حرارتی افراد سالم (18.5<*BMI*<24.9)

**Table 5** Thermal sensation for healthy occupants (18.5<*BMI*<24.9)

| | | E | D | C | B | A |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مرد | $TSENS_{br}$ | -0.50 | -0.40 | -0.28 | -0.20 | -0.35 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.07 | -0.03 | 0.27 | 0.73 | -0.01 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.23 | -0.17 | -0.09 | -0.05 | -0.14 |
| زن | $TSENS_{br}$ | -0.57 | -0.44 | -0.29 | -0.21 | -0.37 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.09 | -0.05 | 0.25 | 0.67 | -0.02 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.27 | -0.20 | -0.10 | -0.06 | -0.15 |

**جدول 6** احساس حرارتی افراد چاق (*BMI*>30)

**Table 6** Thermal sensation for obese occupants (*BMI*>30)

| | | E | D | C | B | A |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مرد | $TSENS_{br}$ | -0.26 | -0.22 | -0.15 | -0.11 | -0.19 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.02 | 0.31 | 0.61 | 0.89 | 0.50 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.10 | -0.07 | -0.02 | 0.00 | -0.05 |
| زن | $TSENS_{br}$ | -0.28 | -0.24 | -0.15 | -0.11 | -0.20 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.05 | 0.30 | 0.60 | 0.87 | 0.50 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.12 | -0.08 | -0.03 | 0.00 | -0.05 |

**جدول 7** احساس حرارتی افراد لاغر (*BMI*<18.5)

**Table 7** Thermal sensation for underweight occupants (*BMI*<18.5)

| | | E | D | C | B | A |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مرد | $TSENS_{br}$ | -0.59 | -0.44 | -0.29 | -0.21 | -0.37 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.12 | -0.06 | 0.25 | 0.71 | -0.04 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.29 | -0.20 | -0.10 | -0.07 | -0.17 |
| زن | $TSENS_{br}$ | -0.68 | -0.47 | -0.30 | -0.22 | -0.38 |
| | $TSENS_{cl}$ | -0.20 | -0.09 | 0.22 | 0.65 | -0.05 |
| | $TSENS_{ov}$ | -0.33 | -0.24 | -0.12 | -0.08 | -0.18 |

با هر خصوصیاتی که در این مکان مستقر شود در آسایش حرارتی کامل خواهد بود. احساس حرارتی کلی و قسمت برهنه بدن در جایگاه B برای هر سه حالت تناسب وزنی، چاق و لاغر در ناحیه آسایش حرارتی قرار دارد، ولی قسمت پوشیده بدن فرد از شرایط آسایش حرارتی خارج‌شده و احساس گرما می‌کند.

برای زنان در مقایسه با مردان و برای افراد لاغر در مقایسه با دو حالت دیگر به محدوده آسایش حرارتی نزدیک‌تر است.

احساس حرارتی در جایگاه C برای هر دو جنسیت و برای هر سه حالت تناسب وزنی، چاق و لاغر در ناحیه آسایش حرارتی قرار دارد، ولی فرد چاق در ناحیه پوشیده دارای شرایط خارج از آسایش است. در جایگاه D و در تمام شرایط احساس حرارتی افراد در محدوده مجاز قرار دارد. در جایگاه E احساس حرارتی قسمت برهنه افراد لاغر برای هر دو جنسیت و افراد سالم در زنان خارج از محدوده آسایش حرارتی قرار داشته و فرد احساس سرما می‌کند. برای افراد چاق و برای هر دو جنس زنان و مردان شرایط مطلوب و در ناحیه آسایش حرارتی قرار دارند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در جایگاه E تفاوت در احساس حرارتی قسمت برهنه بدن بین زن لاغر و مرد چاق 0.42 واحد که در ارزیابی آسایش حرارتی قابل ملاحظه است.

## 6- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل آسایش حرارتی انفرادی سه نقطه‌ای به تحلیل عوامل فردی بر آسایش حرارتی افراد در یک مکان پرجمعیت پرداخته شده است. برای این منظور جریان هوا در یک سالن پرجمعیت که در آن هوا از طریق دریچه‌های نواری واقع در کف به صورت افقی وارد فضا شده و از سقف آن خارج می‌شود مدل‌سازی شده است. در ابتدا و با استفاده از مدل دو بخشی گایج و به طریق روش سعی و خطا دمای هوای ورودی از دریچه‌ها به گونه‌ای تنظیم شده که میانگین شاخص آسایش حرارتی در ناحیه حضور افراد برابر با صفر باشد، سپس تأثیر عوامل فردی بر آسایش حرارتی آن‌ها در یک



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

ردیف از فضای سالن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق از میان عوامل فردی مختلف، دو عامل جنسیت و شاخص توده بدنی مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن‌جایی که در فضای مورد مطالعه دمای هوای ورودی به گونه‌ای تنظیم شده که تقریباً شرایط آسایش حرارتی خنثی در مجاورت فرد ایجاد شود، تفاوت اندکی به سبب نوع جنسیت در احساس حرارتی افراد وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که زن‌ها نسبت به مردها در مقابل شرایط سرما حساس‌تر هستند و در صورتی که از وضعیت خنثی خارج شوند احساس سردی، ولی افراد چاق‌تر و با شاخص توده بدنی بالاتر در مقایسه با دیگر افراد کمتر احساس سرما می‌کنند. همچنین جایگاه کنار دیوار در ردیف‌های مختلف از بحرانی‌ترین جایگاه‌ها به لحاظ احساس سرماست. از این‌رو افراد چاق‌تر با شاخص توده بدنی بالاتر در این مکان احساس بهتری در مقایسه با دیگر افراد خواهند داشت. به عبارت دیگر با استقرار مردی چاق در مقایسه با خانمی لاغر در همین جایگاه حدود 0.42 واحد در شاخص احساس حرارتی تفاوت مشاهده می‌شود.

## 7- توصیه‌های کاربردی

بنابر نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق چند توصیه برای مهندسان معماری و مکانیک درخصوص طراحی مکان‌های پرجمعیت ارائه می‌شود.

- برای طراحی این مکان‌ها حتماً در ابتدا به جامعه انسانی هدف توجه شود. طراحی این مکان‌ها برای افراد در شرایط سنی و جسمانی مختلف باید متفاوت باشد.
- در صورت امکان دریچه‌های ورود هوا در طراحی سالن‌های اجتماعات مدارس، مهدهای کودک، خانه سالمندان نزدیک به افراد قرار نداشته باشد.
- با توجه به حساسیت بالاتر بانوان نسبت به سرما و وزش هوا در طراحی تالار اجتماعات مختص ایشان باید کنترل مناسبی روی سرعت وزش در نزدیکی جایگاه استقرار افراد اعمال شود.

## 8- فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $A_D$ | سطح تماس بدن ($m^2$) |
| $g$ | شتاب گرانش ($ms^{-2}$) |
| $M$ | نرخ متابولیک ($Wm^{-2}$) |
| $P$ | فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$) |
| $Q$ | تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح ($Wm^{-2}$) |
| $Q_{cr-sk}$ | تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح ($Wm^{-2}$) |
| $S$ | نرخ ذخیره حرارتی ($Wm^{-2}$) |
| $\vec{S}$ | نیروهای حجمی ($kgm^{-2}s^{-2}$) |
| $T$ | دما (K) |
| TSENS | شاخص آسایش حرارتی (بی‌بعد) |
| $V$ | سرعت ($ms^{-1}$) |
| $W$ | کار خارجی ماهیچه‌ها ($Wm^{-2}$) |

### علایم یونانی

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | ضریب نفوذ ($kgm^{-3}$) |
| $\beta$ | ضریب انبساط حجمی ($K^{-1}$) |
| $\eta$ | بازده (بی بعد) |
| $\lambda$ | نسبت سطح بخش‌های لخت بدن (بی‌بعد) |
| $\mu$ | لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$) |
| $\rho$ | چگالی ($kgm^{-3}$) |

### زیرنویس‌ها

| | |
|---|---|
| b | مربوط به بدن |
| bl | مربوط به خون |
| br | لخت |
| cl | لباس |
| conv | جابه‌جایی |
| cr | مرکز بدن |
| eff | مؤثر |
| ov | کلی |
| rad | تابشی |
| ref | مرجع |
| res | تنفسی |
| t | اغتشاشی |

## 9- مراجع

[1] Y. J. P. Lin, C. L. Lin, A study on flow stratification in a space using displacement ventilation, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, No. 1, pp. 67-75, 2014.
[2] A. Q. Ahmed, S. Gao, A.K. Kareem, A numerical study on the effects of exhaust locations on energy consumption and thermal environment in an office room served by displacement ventilation, *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, No. 1, pp. 74-85, 2016.
[3] G. Kim, L. Schaefer, T. S. Lim, J. T. Kim, Thermal comfort prediction of an underfloor air distribution system in a large indoor environment, *Energy and Buildings*, Vol. 64, No. 1, pp. 323-351, 2013.
[4] G. Cao, H. Awbi, R. Yao, Y.Fan, K. Sirén, R. Kosonen, J. Zhang, A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings, *Building and Environment*, Vol. 73, No. 1, pp. 171-186, 2014.
[5] L. Magnier, R. Zmeureanu, D. Derome, Experimental assessment of the velocity and temperature distribution in an indoor displacement ventilation jet, *Building and Environment*, Vol. 47, No. 1, pp. 150-160, 2012.
[6] X. Wu, B. W. Olesen, L. Fang, J. Zhao, A nodal model to predict vertical temperature distribution in a room with floor heating and displacement ventilation, *Building and Environment*, Vol. 59, No. 1, pp. 624-634, 2013.
[7] W. Chakroun, K. Ghali, N. Ghaddar, Air quality in rooms conditioned by chilled ceiling and mixed displacement ventilation for energy saving, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 10, pp. 2684-2695, 2011.
[8] A. W. Woods, Sh. Fitzgerald, S. Livermore, A comparison of winter preheating requirements for natural displacement and natural mixing ventilation, *Energy and Buildings*, Vol. 41, No. 12, pp. 1306-1312, 2009.
[9] K. W. D. Cheong, E. Djunaedy, Y. L. Chua, K. W. Tham, S. C. Sekhar, N. H. Wong, M. B. Ullah, Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics, *Building and Environment*, Vol. 38, No. 1, pp. 63-73, 2003.
[10] J. Lau, Q. Chen, Floor-supply displacement ventilation for workshops, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 4, pp. 1718-1730, 2007.
[11] F. Causone, F. Baldin, B.W. Olesen, S.P. Corgnati, Floor heating and cooling combined with displacement ventilation: Possibilities and limitations, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 12, pp. 2338-2352, 2010.
[12] M.H. Fathollahzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Prediction of thermal comfort, IAQ, and energy consumption in a dense occupancy environment with the under floor air distribution system, *Building and Environment*, Vol. 90, No. 1, pp. 96-104, 2015.
[13] S. A. Nada, H. M. El-Batsh, H. F. Elattar, N. M. Ali, CFD investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications,

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]

*Building and Environment*, Vol. 6, No. 1, pp. 274-300, 2016.
[14] M.H. Fathollahzadeh, G. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, Producing a better performance for the under floor air distribution system in a dense occupancy space, *Building and Environment*, Vol. 126, No. 1, pp. 230-238, 2016.
[15] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new simplified model for evaluating non-uniform thermal sensation caused by wearing clothing, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 3, pp. 776-783, 2010.
[16] 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*, Vol. 16, No. 8, pp. 149-158, 2016. (in Persian فارسی)
[17] L. Lan, Z. Lian, W. Liu, Y. Liu, Investigation of gender difference in thermal comfort for Chinese people, *European Journal Applied Physiology*, Vol. 102, No. 4, pp. 471-480, 2008.
[18] G. Eknoyan, Adolphe Quetelet,the average man and indices of obesity, *Nephrology Dialysis Transplantation*, Vol. 23, No. 1, pp. 47-51, 2008.
[19] N. Kobayashi, Q. Chen, Floor supply displacement ventilation in a small office, *Indoor and Built Environment*, Vol. 12, No. 4, pp. 281-292, 2003.
[20] P. J. Roache. Perspective: A Method for uniform reporting of grid refinement studies, *Fluids Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 405-413, 1994.
[21] Kh. Elsayed, C. Lacor. Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters, *Computers & Fluids*, Vol. 51, No. 1, pp. 48-59, 2011.
[22] A. M. Claessens-van Ooijen, K. R. Westerterp, L. Wouters, P. F. Schoffelen, A. A. van Steenhoven, W. D. van Marken Lichtenbelt, Heat production and body temperature during cooling and rewarming in overweight and lean men, *Obesity (Silver Spring)*, Vol. 14, No. 11, pp. 1914-1920, 2006.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.2.20.2 ]