



# بررسی چگونگی تأثیر عوامل مختلف فردی بر روی احساس حرارتی افراد با استفاده از مدل فردی سه نقطه‌ای

فرزین داودی<sup>1</sup>، حسن حسن‌زاده<sup>2</sup>، سید علیرضا ذوالفقاری<sup>2\*</sup>، مهدی معرفت<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/376 zolfaghari@birjand.ac.ir

## چکیده

با داشتن ارزیابی صحیح و کاملی از احساس حرارتی افراد می‌توان به طراحی مناسب و بهینه‌ای برای سیستم‌های گرمایشی و تهویه دست یافت و با کمترین میزان مصرف انرژی، شرایط آسایش حرارتی را در محیط مورد نظر ایجاد کرد. تفاوت‌های فیزیولوژیکی افراد مختلف از قبیل 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 آنجایی که در مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی، پارامترهای فردی لحاظ نشده و این مدل‌ها برای جمعیت‌های گسترده انسانی توسعه یافته است، برای پیش‌بینی آسایش حرارتی اشخاص لزوماً به جوابی دقیق و منطبق بر واقعیت نمی‌انجامد. در این تحقیق تلاش شده است، با استفاده از مدلی فردی، چگونگی تأثیر هر کدام از عوامل مختلف فردی مانند وزن، قد و جنسیت را بر روی احساس حرارتی افراد به صورت مجزا بررسی شود. در مدل فردی سه نقطه‌ای توسعه یافته، با اصلاح مدل‌سازی لباس با رویکردی که شرایط حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن به طور مجزا ارزیابی می‌شود و همچنین با در نظر گرفتن تأثیرگذاری خصوصیات فردی در ساختار الگوریتم مدل، می‌توان به پیش‌بینی مناسبی از احساس حرارتی فرد دست پیدا کرد. نتایج نشان می‌دهد که تفاوت افراد در ترکیب وزن و قد خود در شرایط معینی از محیط، می‌تواند اختلافی برابر با 1.5 واحد در احساس حرارتی آن‌ها ایجاد کند. همچنین در دمای 15 درجه سلسیوس، با در نظر گرفتن جنسیت و شاخص توده بدنی افراد، زن‌ها از 0.27 تا 0.9 واحد نسبت به مردها احساس حرارتی سرمایی بیشتری دارند.

**کلید واژگان:** خصوصیات حرارتی فردی، احساس حرارتی افراد، مدل تنظیم حرارتی فردی، مدل آسایش حرارتی سه نقطه‌ای

## Investigating the effects of individual characteristics on thermal sensation by individual three-node model

Farzin Davoodi<sup>1</sup>, Hasan Hasanzadeh<sup>1</sup>, Alireza Zolfaghari<sup>1\*</sup>, Mehdi Marefat<sup>2</sup>

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

## ABSTRACT

Comprehensive evaluation of individual thermal sensation could help engineers to optimum design heating and cooling systems, in order to reduce energy consumption. Differences in the persons' individual parameters such as age, gender, weight, height and basal metabolic rate have a significant effect on the human body thermoregulation and thermal sensation. Since the individual parameters have not been considered in standard thermal comfort models, they don't lead to accurate results for specific individuals. In this study, the impact of individual characteristics, including weight, height and gender, on thermal sensation have been evaluated separately and discussed to improve the prediction of thermal comfort for different persons. Individual three-node model has been accurately estimated thermal sensation of the bare and clothed parts of the body by considering individual physiological differences in human thermoregulation. The model has been verified against the analytical and experimental results where a good agreement was found. Sensitivity analysis revealed that the differences in BMI's persons could result in a variance of 1.5 unit in calculation of thermal sensation. Thermal sensation results show that females, compared with males, are more sensitive at 15 °C (as operative temperature) and the difference, depending on BMI's subjects, is within the range of 0.27-0.9 units.

**Keywords:** Thermal individual characteristic, Individual thermal sensation, Human body thermoregulation, Three-node model

## 1- مقدمه

رویکرد ساده آن‌ها در مدل‌سازی لباس و در نظر گرفتن خصوصیات فردی است که می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنظیم حرارتی بدن داشته باشد. در سال 1990، هاوینیس و همکارانش [3] در تحقیقات تجربی خود تأثیرات تناسب فیزیکی بدن، سازگاری بدن با محیط، مقیاس‌های ابعادی بدن و جنسیت را روی واکنش‌های فردی در تنظیم حرارتی بدن مورد بررسی قرار دادند. هاوینیس [4] در سال 2001، با دیدگاه معادل قرار دادن سیستم تنظیم دمای بدن با یک نمودار بلوکی کنترلی، مدلی فردی برای سیستم تنظیم

مدل‌های آسایش حرارتی رایج و استاندارد فقط سطح فعالیت و نوع پوشش را در معادلات خود شامل می‌شوند ولی از تأثیر عواملی از قبیل سن، جنسیت و تناسب بدنی افراد صرف‌نظر شده است. بنابراین ضرورت توسعه یک مدل حرارتی ساده ولی منطبق با واقعیت فیزیولوژیکی بدن و بررسی چگونگی تأثیرات پارامترهای فردی در آن کاملاً احساس می‌شود. از نواقص مدل‌های استاندارد، مانند مدل پایای فنگر [1] و مدل گذرای دو نقطه‌ای گایج [2]،

Please cite this article using:

F. Davoodi, H. Hasanzadeh, A. Zolfaghari, M. Marefat, Investigating the effects of individual characteristics on thermal sensation by individual three-node model, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 64-68, 2016 (in Persian)

(فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

$$S_{sk,br} = Q_{cr-sk,br} - (Q_{conv,br} + Q_{rad,br} + Q_{evap,br}) \quad (2)$$

$$S_{sk,cl} = Q_{cr-sk,cl} - (Q_{conv,cl} + Q_{rad,cl} + Q_{evap,cl}) \quad (3)$$

که زیرنویس‌های br و cl به ترتیب بیانگر بخش‌های لخت و پوشیده بدن هستند. همچنین  $\lambda$  نسبت سطح بخش‌های لخت  $A_{br}$  به سطح کل بدن  $A_D$  است.

در نهایت، می‌توان شاخص‌های زیر را برای ارزیابی احساس حرارتی بخش‌های لخت، پوشیده و کل بدن تعریف نمود:

$$TSENS_{br} = \begin{cases} 0.4685(T_{b,br} - T_{b,c}) & T_{b,br} < T_{b,c} \\ 0.47\eta_{e,br}(T_{b,br} - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) & T_{b,c} \leq T_{b,br} \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_{e,br} + 0.685(T_{b,br} - T_{b,h}) & T_{b,h} < T_{b,br} \end{cases} \quad (4)$$

$$TSENS_{cl} = \begin{cases} 0.4685(T_{b,cl} - T_{b,c}) & T_{b,cl} < T_{b,c} \\ 0.47\eta_{e,cl}(T_{b,cl} - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) & T_{b,c} \leq T_{b,cl} \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_{e,cl} + 0.685(T_{b,cl} - T_{b,h}) & T_{b,h} < T_{b,cl} \end{cases} \quad (5)$$

$$TSENS_{ov} = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & T_b < T_{b,c} \\ 0.47\eta_e(T_b - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) & T_{b,c} \leq T_b \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) & T_{b,h} < T_b \end{cases} \quad (6)$$

## 2-2- مدل سازی عوامل فردی

شاخص توده بدنی، سنجشی آماری برای مقایسه وزن و قد یک فرد است [15].

$$BMI = \frac{m}{l^2} \quad (7)$$

یکی از عواملی که نقش بسیار مهمی در تعیین دقیق دمای بدن در مدل‌های آسایش حرارتی مختلف دارد، میزان چربی بدن است که می‌تواند بر ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی ویژه و شارش خون تأثیرگذار باشد. برای به‌دست آوردن میزان درصد چربی بدن، رابطه (8) ارائه شده است که تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد [16].

$$BF = c_{bf,b} \cdot BMI + c_{bf,a} \cdot age + c_{bf,0} \quad (8)$$

که در رابطه فوق  $BF$  درصد چربی بدن،  $BMI$  شاخص توده بدنی و  $age$  سن فرد به سال می‌باشد. ضرایب  $c_{bf,b}$ ،  $c_{bf,a}$  و  $c_{bf,0}$  به ترتیب 1.330، 0.236 و 20.20- برای مردان همچنین 1.210، 0.262 و 6.70- برای زنان می‌باشد. می‌توان با داشتن میزان چربی موجود در بدن افراد، ظرفیت گرمایی ویژه آن‌ها را محاسبه نمود:

$$R_{core-skin} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{skin \text{ blood flow}}} + \frac{1}{R_{muscle} + R_{fat+skin}}\right)} \quad (9)$$

که:

$$R_{muscle} = \frac{0.05}{1 + \left(\frac{Met-65}{130}\right)} \quad (10)$$

$$R_{skin \text{ blood flow}} = \frac{1}{\eta \cdot C_{p,bl} \cdot \dot{m}_{bl}} \quad (11)$$

$$R_{fat+skin} = 0.0048(\delta_{fat+skin} - 2) + 0.0044 \quad (12)$$

که  $R$  مقاومت حرارتی ( $m^2K/W$ )،  $\eta$  بازده تبادل حرارت خون،  $C_{p,bl}$  ظرفیت گرمایی خون ( $J/kgK$ )،  $\dot{m}_{bl}$  نرخ جریان خون پوستی ( $kg/s$ )،  $Met$  نرخ متابولیک ( $W/m^2$ ) و  $\delta_{fat+skin}$  ضخامت لایه چربی (mm) است. برای به‌دست آوردن ضخامت لایه چربی خواهیم داشت:

$$\delta_{fat+skin} = 0.5 \cdot ASF \quad (13)$$

حرارت بدن ارائه نمود. همچنین، ژانگ و آرس [5] طی تحقیقات خود توانستند از یک سری پارامترهای در دسترس مانند قد، وزن و جنسیت به خواصی مانند میزان چربی بدن، چگالی، تولید حرارت متابولیک پایه و ظرفیت گرمایی بافت دست پیدا کنند. در سال 2002، پارسونس [6] در یک تحقیق آزمایشگاهی تأثیر جنسیت، شرایط سازگاری با محیط و ناتوانی فیزیکی افراد را روی شرایط آسایش حرارتی مورد بررسی قرار داد. او نشان داد زن‌ها نسبت به مردها در سرما حساس‌تر هستند. گنون [7] در سال 2012 تأثیرات وابسته به جنسیت در واکنش‌های حرارتی بدن را مورد بررسی قرار داد. او نشان داد که برای اتلاف حرارتی اندک، سازوکارهای تنظیم حرارت مرد و زن تقریباً یکسان عمل می‌کنند ولی برای اتلاف حرارتی بالا، تفاوت‌هایی از جمله دمای شروع یا همان آستانه تعرق و میزان تعرق به وجود می‌آید. کارجالانین و همکارانش [9,8] در سال 2012، گزارش کردند که به طور معمول ناراضیاتی حرارتی زن‌ها نسبت به محیط اطراف بیشتر می‌باشد. به عبارتی زن‌ها نسبت به انحراف از حالت خنثی حرارتی به خصوص در شرایط سرد بسیار حساس‌تر هستند. ژو و همکارانش [10] در سال 2013 در تحقیقات خود نشان دادند تفاوت‌هایی در ابعاد بدن و ترکیب آن بین افراد بالغ چینی و غربی‌ها وجود دارد، به این سبب آن‌ها یک مدل فردی و بومی برای تنظیم دمای بدن توسعه دادند. این مدل فردی توسط چهار پارامتر قد، وزن، سن و جنسیت انجام پذیرفت و اعتبارسنجی‌های لازم به‌وسیله داده‌های تجربی و مدل فیلا [11] صورت گرفت. این تحلیل نشان داد که تغییر پارامترهای قد و وزن می‌تواند حتی تا 2 درجه سلسیوس موجب تغییر دمای پوست افراد شود. هولوپاین [12] در سال 2013 در تحقیق خود تأثیر خصوصیات فردی از جمله سن، جنسیت و شاخص تناسب بدنی را روی احساس حرارتی افراد بررسی کرد. ذوالفقاری و معرفت [13]، در تحقیقی تلاش کردند تا یکی از اساسی‌ترین اشکالات مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی که رویکرد ساده آن‌ها در مدل‌سازی لباس است را با ایجاد اصلاحی در مدل گایج برطرف کنند و مدل سه نقطه‌ای را ارائه کردند. نویسندگان تحقیق حاضر، داودی و همکاران [14]، مدل سه نقطه‌ای را به مدلی فردی توسعه داده و مدل با استفاده از نتایج تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

در این مقاله، با استفاده از مدل توسعه یافته سه نقطه‌ای چگونگی تأثیر عوامل فردی مانند وزن، قد و جنسیت در شرایط مختلف دمایی محیط، بر روی احساس حرارتی افراد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## 2-2- مدل سه نقطه‌ای 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 و معادلات موازنه انرژی و همچنین سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت برای هر یک از این بخش‌ها بطور مجزا در نظر گرفته می‌شود. برای در نظر گرفتن تأثیر عوامل فردی در این مدل، با استفاده از روابط موجود و معتبر از اطلاعاتی همچون قد، وزن، جنسیت و اطلاعات ابعادی بدن به خواصی مثل درصد چربی بدن، مساحت کل بدن، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و میزان تعرق به‌دست می‌آید.

## 2-1- معادلات حاکم

معادلات موازنه انرژی برای هر یک از بخش‌های بدن (مرکز، پوست فاقد پوشش و پوست پوشیده) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

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

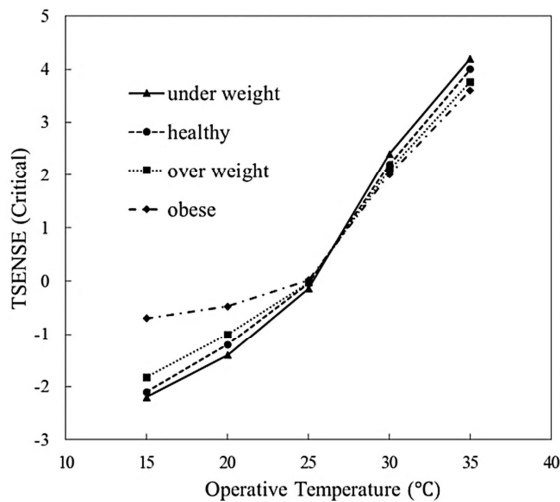


Fig. 2 comparison of thermal sensation (males) for different BMI

شکل 2 مقایسه احساس حرارتی افراد (مرد) با شاخص توده بدنی متفاوت

فیزیک بدنی افراد برای زن‌ها نیز وجود دارد. البته مقدار کمی شاخص احساس حرارتی در زن‌ها نسبت به مردها متفاوت می‌باشد، که چگونگی این تفاوت‌ها در "شکل 4" با استفاده از شاخص  $\Delta TSENSE$  که بیانگر اختلاف بین احساس حرارتی مردان و زنان در یک دمای عملیاتی تعریف می‌شود، به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در سرما حساسیت زن‌ها نسبت به مردها بیشتر می‌باشد. در دمای 15 درجه سلسیوس با توجه به شرایط اشاره شده مشترک و فقط با تفاوت جنسیت افراد در حدود 0.9 واحد اختلاف در شاخص حرارتی افراد ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، در شرایطی با خصوصیات فردی و شرایط محیطی سرد یکسان، وقتی شاخص احساس حرارتی مرد بسیار چاق، 0.7- می‌باشد، یک زن با همان مشخصات فردی در این شرایط محیطی احساس حرارتی معادل با 1.6- را دارا می‌باشد.

این اختلاف در دماهای بالاتر محیطی کاهش پیدا می‌کند تا در دمای خنثی به حداقل اختلاف رسیده و مجدداً در دماهای گرم این اختلاف افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی در دماهای بالا زن‌ها کمتر از مردها احساس گرما می‌کنند و به شرایط آسایش نزدیک‌تر هستند، البته این حساسیت در مقایسه با سرما بسیار کمتر است.

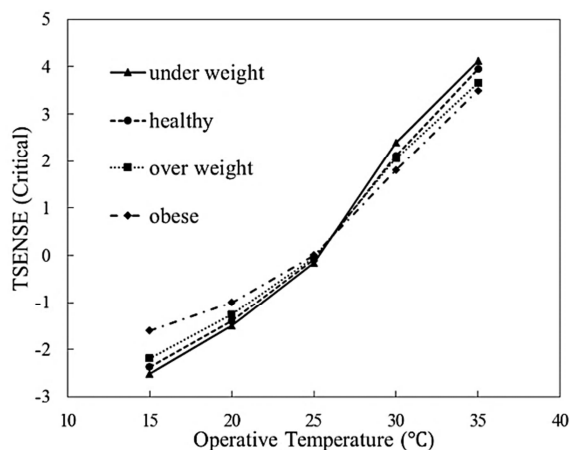


Fig. 3 comparison of thermal sensation (females) for different BMI

شکل 3 مقایسه احساس حرارتی افراد (زن) با شاخص توده بدنی متفاوت

که  $ASF$  مقدار متوسط چین پوستی<sup>1</sup> فرد می‌باشد. تعیین این پارامتر به عنوان ورودی به مدل برای افراد مختلف چندان در دسترس نمی‌باشد. بنابراین باید به روش غیرمستقیم و با کمک گرفتن از چگالی و میزان چربی بدن، این مقدار را بدست آورد.

### 3- بحث و بررسی نتایج

در این بخش تلاش می‌شود با استفاده از مدل فردی سه نقطه‌ای، چگونگی نقش عوامل فردی در تعیین شاخص احساس حرارتی افراد بررسی گردد. با ارزیابی هر کدام از خصوصیات فردی به طور جداگانه در نتایج، میزان تأثیرگذاری آن عامل فردی در پیش‌بینی آسایش حرارتی افراد مورد بحث قرار گرفته شده است.

در ابتدا، برای بررسی عملکرد افراد در شبیه‌سازی، آزمایشی طراحی شده است که زمان‌بندی و شرایط محیطی آن در "شکل 1" نشان داده شده است. در این آزمایش افراد به صورت نشسته با پوششی خانگی (0.5 clo) در نظر گرفته شده که صورت، دست‌ها و مچ پای آن‌ها بدون پوشش است. این شبیه‌سازی‌ها در دماهای مختلف محیطی (سرد، خنثی و گرم) با رطوبت نسبی 50% انجام می‌پذیرد و نتایج گزارش می‌گردد. به منظور بررسی نقش شاخص توده بدنی یا همان تناسب اندامی در تعیین احساس حرارتی افراد 4 مرد و 4 زن با وزن و قد‌های متفاوت که در جدول 1 آمده است در نظر گرفته می‌شود. قابل ذکر می‌باشد به گونه‌ای این افراد انتخاب شده‌اند که در چهار گروه متفاوت شاخص توده بدنی از لحاظ ترکیب فیزیکی متفاوت (کاهش وزن، سلامت وزنی، افزایش وزن، بسیار چاق) قرار گرفته‌اند. در جدول 1 خصوصیات از قبیل میزان چربی، ظرفیت گرمایی بافت و ضخامت لایه چربی زیر پوستی فرد که با استفاده از عوامل فردی مستقل، در کد محاسبه می‌شود، نیز آورده شده است. در جدول 2 نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی برای 4 مرد با تناسب اندامی متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شاخص احساس حرارتی این افراد در دماهای پایین در حالت بدون پوشش و در دماهای بالا در حالت با پوشش بحرانی‌تر بوده و از حالت خنثی فاصله گرفته است. حال در "شکل 2" نمودار مربوط به شاخص احساس حرارتی با توجه به توده بدنی متفاوت افراد در دماهای مختلف محیطی نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودار قابل مشاهده می‌باشد، در دماهای سردتر محیطی افراد با توده بدنی بیشتر کمتر از افراد دیگر احساس سرما می‌کنند. از سوی دیگر، نتایج تحقیقات تجربی نیز نشان داده است که در شرایط مواجهه با سرما، افراد چاق نسبت به افراد لاغر رفتاری کندتر از خود بروز می‌دهند [17]، که نتایج به‌دست آمده از مدل توسعه یافته به این واقعیت صحت می‌گذارد.

در "شکل 3" نمودار احساس حرارتی برای زن‌ها با توجه به شرایط ذکر شده نشان داده شده است، که با توجه به نمودار همان روند قبلی با توجه به

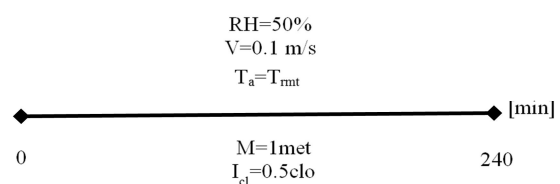


Fig. 1 simulation schedule

شکل 1 شرایط محیطی و زمان‌بندی شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Skinfold

جدول 1 اطلاعات افراد تحت آزمایش

Table 1 subject characteristic

کاهش وزن (BMI<18.5)		سلامت وزنی (18.5<BMI<24.9)		افزایش وزن (25<BMI<29.9)		بسیار چاق (30<BMI)		مشخصه (4 مرد و 4 زن)
زن	مرد	زن	مرد	زن	مرد	زن	مرد	
18	22.5	27.1	33	22.5	30	110	30	مشخصه توده بدنی ( $\text{kg/m}^3$ )
30	30	30	30	30	30	30	30	سن (years)
45	65	83	110	45	65	110	30	وزن (kg)
1.58	1.7	1.75	1.8	1.58	1.7	1.8	1.8	قد (m)
1.4	1.74	1.98	2.2	1.4	1.74	2.2	2.2	مساحت بدن ( $\text{m}^2$ )
3388	3458	3326	3168	3388	3458	3168	3284	ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{J/kgK}$ )
6.98	8.2	10.2	18.5	6.98	8.2	18.5	15.8	ضخامت لایه چربی (mm)
10.8	22.1	16.8	39.2	10.8	22.1	39.2	32.03	درصد چربی بدن (%)

جدول 2 نتایج به دست آمده برای احساس حرارتی مردان در دماهای مختلف عملیاتی

Table 2 Results for males' thermal sensation at different operative temperature

کاهش وزن (BMI<18.5)			سلامت وزنی (18.5<BMI<24.9)			افزایش وزن (25<BMI<29.9)			دمای عملیاتی (°C)
TSENSov	TSENSbr	TSENScl	TSENSov	TSENSbr	TSENScl	TSENSov	TSENSbr	TSENScl	
-1.34	-2.2	-1.05	-1.5	-2.1	-1.25	-1.6	-1.82	-1.25	15
-0.72	-1.4	-0.52	-0.7	-1.2	-0.48	-0.6	-1.01	-0.48	20
-0.05	-0.14	0.12	-0.04	-0.15	0.21	-0.038	-0.08	0.21	25
2.2	2.1	2.4	1.9	1.8	2.1	1.84	1.66	2.1	30
4.02	3.9	4.2	3.98	3.8	3.76	3.7	3.6	3.76	35

1- در دماهای عملیاتی پایین، افراد چاق کمتر از افراد با وزن کمتر احساس سرما می‌کنند.

2- در دماهای عملیاتی خنثی (در حدود 25 درجه سلسیوس) تقریباً همه افراد با شاخص توده بدنی متفاوت از لحاظ احساس حرارتی رفتاری مشابه دارند.

3- زن‌ها در شرایط سرد، حساسیت بیشتری از خود نسبت به مردها نشان می‌دهند.

4- زن‌ها با شاخص توده بدنی بیشتر اختلاف احساس حرارتی بیشتری نسبت به مردها از خود نشان می‌دهند.

#### 5- فهرست علائم

$A_D$	سطح تماس بدن ( $\text{m}^2$ )
$C_{p,b}$	ظرفیت گرمایی ویژه بدن ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$C_{p,bl}$	ظرفیت گرمایی ویژه خون ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$CSIG$	سیگنال سرد (بی بعد)
$D$	دانسیته بدن ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$f_{cl}$	فاکتور لباس (بی بعد)
$f_r$	فاکتور تشعشع (بی بعد)
$h_c$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$h_r$	ضریب انتقال حرارت تشعشعی ( $\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ )
$l$	قد شخص (m)
$m$	جرم بدن (kg)
$M$	نرخ متابولیک ( $\text{Wm}^{-2}$ )

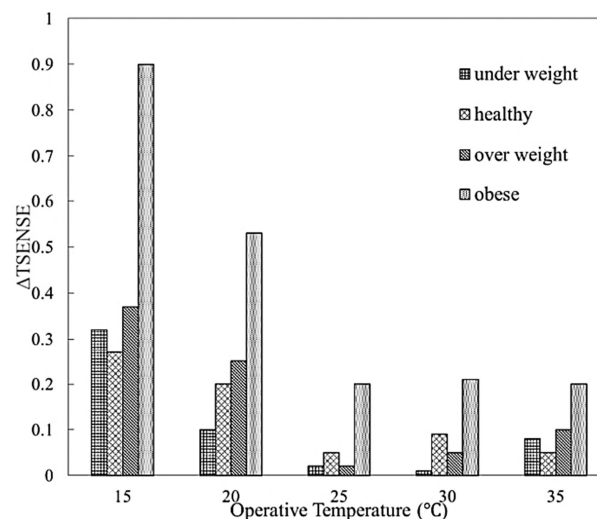


Fig. 4 comparison of difference thermal sensation between males and females for different BMI.

شکل 4 مقایسه اختلاف شاخص حرارتی مردان نسبت به زنان با توده بدنی متفاوت

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با کمک گرفتن از مدل سه نقطه‌ای فردی، عوامل فردی مؤثر بر روی احساس حرارتی افراد مورد ارزیابی قرار گرفت. افراد به تفکیک جنسیت به چهار گروه اصلی از لحاظ شاخص توده بدنی تقسیم شدند و شبیه‌سازی در دماهای عملیاتی متفاوت انجام گرفت. به‌طور خلاصه نتایجی سودمند و منطبق بر واقعیت به شرح ذیل به دست آمد:

- [2] A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk, Y. Nishi, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions*, Vol. 77, No. 1, pp. 247-262, 1971.
- [3] G. Havenith, H. van Middendorp, The relative influence of physical fitness, acclimatization state, anthropometric measures and gender on individual reactions to heat stress, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 61, No. 5-6, pp. 419-427, 1990.
- [4] G. Havenith, Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 90, No. 5, pp. 1943-1954, 2001.
- [5] H. Zhang, C. Huizenga, E. Arens, T. Yu, Considering individual physiological differences in a human thermal model, *Journal of Thermal Biology*, Vol. 26, No. 4-5, pp. 401-408, 2001.
- [6] K. C. Parsons, The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort, *Energy and Buildings*, Vol. 34, No. 6, pp. 593-599, 2002.
- [7] D. Gagnon, G. P. Kenny, Does sex have an independent effect on thermoeffector responses during exercise in the heat?, *The Journal of Physiology*, Vol. 590, No. 23, pp. 5963-5973, 2012.
- [8] S. Karjalainen, Thermal comfort and gender: a literature review, *Indoor Air*, Vol. 22, No. 2, pp. 96-109, 2012.
- [9] S. Karjalainen, Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 4, pp. 1594-1603, 2007.
- [10] X. Zhou, Z. Lian, L. Lan, An individualized human thermoregulation model for Chinese adults, *Building and Environment*, Vol. 70, No. 0, pp. 257-265, 2013.
- [11] D. Fiala, L. K.J., M. Stohrer, Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 45, pp. 143-159, 2001.
- [12] P. Tuomaala, R. Holopainen, K. Piira, M. Airaksinen, Impact of individual characteristics—such as age, gender, BMI, and fitness—on human thermal sensation, *Proceedings of the thirteen International Building Performance Simulation Association conference*, Chambery: France, pp. 2305-2311, 2013.
- [13] 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.
- [14] F. Davoodi, H. Hasanzadeh, 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).
- [15] G. Eknoyan, Adolphe Quetelet, the average man and indices of obesity, *Nephrology Dialysis Transplantation*, Vol. 23, No. 1, pp. 47-51, Jan, 2008.
- [16] D. Fiala, G. Havenith, Modelling Human Heat Transfer and Temperature Regulation, in: A. Gefen, Y. Epstein, *The Mechanobiology and Mechanophysiology of Military-Related Injuries*, pp. 265-302, Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [17] 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, Nov, 2006.

$M_{act}$	نرخ متابولیک فعالیت ( $Wm^{-2}$ )
$M_{shiv}$	نرخ متابولیک لرز ( $Wm^{-2}$ )
$\dot{m}_{bl}$	دبی شارش جریان خون ( $kgs^{-1}m^{-2}$ )
$\dot{m}_{rsw}$	نرخ تعرق تنظیمی ( $kgs^{-1}m^{-2}$ )
$Q$	تولید یا تبادل حرارت بر واحد سطح ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{Cr-sk}$	تبادل حرارت بین مرکز بدن و پوست ( $Wm^{-2}$ )
$R_{cl}$	مقاومت حرارتی لباس ( $m^2CW^{-1}$ )
$S$	نرخ ذخیره حرارتی ( $Wm^{-2}$ )
$t$	زمان (s)
$T$	دما ( $^{\circ}C$ )
$\bar{T}_r$	دمای متوسط تابش ( $^{\circ}C$ )
$TSENS$	احساس حرارتی (بی بعد)
$W$	کار خارجی ماهیچه‌ها ( $Wm^{-2}$ )
$WSIG$	سیگنال گرم (بی بعد)

## علائم یونانی

$\alpha$	کسر تجمع گرمی در ناحیه پوست (بی بعد)
$\eta$	بازده (بی بعد)
$\lambda$	نسبت سطح بخش‌های لخت بدن (بی بعد)
$\mu$	نسبت جرم بخش‌های لخت بدن (بی بعد)

## زیر نویس‌ها

a	هوا
act	فعالیت بدنی
b	مربوط به بدن
bl	مربوط به خون
br	لخت
cl	لباس
conv	جابه‌جایی
cr	مرکز بدن
n	خنثی
ov	کلی
rad	تابشی
res	تنفسی
sk	پوست

## 6- مراجع

- [1] P. O. Fanger, *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, pp. 13-41, New York: McGraw-Hill, 1970.