



توسعه یک مدل سه نقطه‌ای برای پیش‌بینی تأثیر خصوصیات فردی بر احساس حرارتی و تنظیم حرارتی بدن انسان

فرزین داودی¹، حسن حسن‌زاده²، سید علیرضا ذوالفقاری^{2*}، مهدی معرفت³

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 خرداد 1395

پذیرش: 20 تیر 1395

ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

مدل آسایش حرارتی فردی

تنظیم حرارتی بدن

خصوصیات حرارتی فردی

احساس حرارتی افراد

تفاوت‌های فیزیولوژیکی افراد از قبیل وزن، قد، جنسیت، سن و متابولیک پایه می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنظیم حرارتی بدن افراد داشته باشد. بنابراین استفاده از مدل‌های حرارتی بدن که برای جمعیت‌های گسترده انسانی توسعه یافته است، برای اشخاص لزوماً به جواب دقیقی نمی‌انجامد. از آنجایی که در مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی، پارامترهای فردی لحاظ نشده و همچنین مدل‌های فردی و موضعی موجود دارای ساختاری بسیار پیچیده هستند، نیاز به مدلی فردی با ساختاری ساده و دقیق بیشتر از همیشه احساس می‌شود. در این تحقیق، تلاش شده است از طریق خصوصیات فردی قابل اندازه‌گیری و در دسترس، عوامل تأثیرگذار بر تنظیم حرارتی بدن و وابسته به فرد از جمله: درصد چربی بدن، ضخامت چربی زیر پوست، مساحت کل بدن، ظرفیت گرمایی ویژه بدن، مقاومت حرارت کل بدن و ... مدل‌سازی شده و در ساختار الگوریتم مدل سه نقطه‌ای اعمال گردد تا این مدل به مدلی فردی برای پیش‌بینی شرایط حرارتی افراد توسعه پیدا کند. مدل آسایش حرارتی سه نقطه‌ای، مدلی اصلاح شده از مدل استاندارد گایج می‌باشد که به جای مدل‌سازی لباس بر روی تمام سطح بدن، با رویکردی ساده شرایط حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن در آن به صورت مجزا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مدل با نتایج تحلیلی و تجربی مورد اعتبار سنجی قرار گرفت و تطابق مناسبی میان نتایج مشاهده شد. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که میانگین خطا در پیش‌بینی دمای پوست برای فرد از 1.2 درجه سلسیوس در مدل سه نقطه‌ای به 0.4 درجه سلسیوس برای مدل فردی جدید تقلیل می‌یابد.

Developing three-node model to estimate individual characteristics effects on thermal sensation and human body thermoregulation

Farzin Davoodi¹, Hasan Hasanzadeh¹, Seyed Alireza Zolfaghari^{1*}, Mehdi Marefat²

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 07 June 2016
Accepted 10 July 2016
Available Online 14 August 2016

Keywords:

Individual Thermal comfort model
Human body thermoregulation
Thermal individual characteristic
Individual thermal sensation

ABSTRACT

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. Therefore, using the human thermal models that were developed on the basis of large human population does not lead to accurate results for specific individuals. Because the individual parameters have not been considered in standard thermal comfort models and also available individual and local models are so complicated in applications, nowadays, the necessity of developing a simple and accurate individualized model is vital. In this study, some physiological parameters such as: body fat percentage, subcutaneous fat layer thickness, body heat capacity coefficient and tissue conductive resistances have been modeled from readily-available external measurement of individuals and these parameters are incorporated into three node-model algorithm structure to predict individual variations in thermal response between individuals. Three-node thermal comfort model is based on Gagge's standard model that has accurately estimated thermal sensation of the bare and clothed parts of the body. The model has been verified against the analytical and experimental results where good agreement was found. In conclusion, the results indicate that the mean error in prediction of skin temperature is decreased from 1.2°C for three-node model to 0.4°C for the new individual model.

1- مقدمه

حرارتی دارای کاربرد وسیعی در طراحی سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان

و همچنین صنایع خودروسازی، منسوجات، هوا فضا و نظامی می‌باشند. احساس نیاز به پیش‌بینی شرایط حرارتی افراد در موقعیت‌های مختلف،

مدلسازی سازوکارهای تنظیم حرارتی بدن و آسایش حرارتی همیشه از مسائل پیچیده ولی جذاب برای محققان به شمار آمده است. مدل‌های آسایش

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

میزان تعرق افراد بستگی کامل به پارامترهای فردی اشخاص دارد. هاونیس و همکارانش [10] در سال 1998 در ادامه تحقیقات خود، رابطه میان پارامترهای فردی با شدت فعالیت بدنی افراد را به صورت آزمایشگاهی تعیین نمودند. هاونیس [11] در سال 2001، با دیدگاه معادل قرار دادن سیستم تنظیم دمای بدن با یک نمودار بلوکی کنترلی، مدلی فردی برای سیستم تنظیم حرارت بدن ارائه نمود. همچنین، ژانگ و آرنس [12] نشان دادند که با در نظر گرفتن ترکیب بدنی مختلف و پارامترهای فردی در مدل‌های حرارتی می‌توان به صورت کاربردی‌تر از این مدل‌ها استفاده کرد. نکته قابل تأمل این است که این خواص مهم فیزیولوژیکی از اندازه‌گیری‌های ممکن و در دسترس قابل حصول باشد. آنها در سال 2001 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 [13] 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 و همچنین شرایط آسایش حرارتی برای افراد با ناتوانی جسمانی سخت‌تر حاصل می‌شود. در سال 2004، لیچتنبلت و همکارانش [14] در تحقیقی تجربی مقادیر دمای پوست و مرکز بدن که از مدل‌های حرارتی بدن و روش‌های تجربی بدست آمده از 20 نفر را با هم مقایسه کردند و نشان دادند که با اعمال خصوصیات افراد تحت آزمایش می‌توان از مدل‌های حرارتی نتایج قابل قبول‌تری بدست آورد. گنون [15] 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. کارجالاین و همکارانش [16, 17] در سال 2012، گزارش کردند که به طور معمول نارضایتی 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 [18] 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 به وسیله داده‌های تجربی و مدل فیالا [19] صورت گرفت. این تحلیل نشان داد که تغییر پارامترهای قد و وزن می‌تواند حتی تا 2 درجه سلسیوس موجب تغییر دمای پوست افراد شود. در سال 2013، زیلر و همکارانش [20] بیان کردند که به علت توسعه سیستم‌های تهویه انفرادی، نیاز به داشتن مدلی برای آسایش حرارتی فردی بیشتر احساس می‌شود. همچنین نشان دادند که دمای نوک انگشتان نقش برجسته‌ای برای آسایش حرارتی افراد در محیط‌های سرد ایفا می‌کند. هولوپاین [21] در سال 2013 در تحقیق خود تأثیر خصوصیات فردی از جمله سن، جنسیت و شاخص تناسب بدنی را روی احساس حرارتی افراد بررسی کرد. او که در رساله دکتری خود [22] مدل حرارتی انسان را برای بهبود آسایش حرارتی توسعه داده بود، این بار آثار خصوصیات فردی را در مدل خود بررسی کرد و نشان داد که پارامترهای فردی به صورت آشکار روی احساس حرارتی افراد نقش دارند و از این میان میزان چربی بدن و نسبت ماهیچه بافت افراد بیشترین تأثیر را دارند. او پیشنهاد کرد که خصوصیات

محققان را به سمت توسعه مدل‌های تنظیم حرارتی بدن و آسایش حرارتی سوق داد. از سال 1970، مدل‌های آسایش حرارتی زیادی بر مبنای معادلات موازنه انرژی برای بدن انسان توسعه پیدا کرده است که در این میان، مدل پایای فنگر [1] و مدل گذرای دو نقطه‌ای گایج [2] به دلیل سادگی و نیز نتایج نزدیک به نتایج تجربی، به عنوان پرکاربردترین مدل‌ها در این زمینه شناخته شده و در استانداردهای آسایش حرارتی گنجانده شده‌اند [4, 3]. مدل فنگر بر اساس معادله موازنه انرژی برای بدن در شرایط پایا پایه‌گذاری شده - است. فنگر [1] بدن را به صورت یک نقطه با پوشش یکنواخت سراسری لباس در نظر می‌گیرد و معادله موازنه انرژی میان بدن و محیط اطراف را حل می‌کند. همچنین در مدل دو لایه‌ای گایج، بدن به صورت دو استوانه هم مرکز مدل می‌شود که استوانه داخلی نماینده مرکز بدن (اسکلت، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) بوده و استوانه خارجی نشانگر پوست می‌باشد که ارتباط این دو قسمت از طریق سازوکار هدایت حرارتی و جریان خون برقرار است. پس از اینکه گایج [2] مدل دو لایه‌ای خود را ارائه نمود، بسیاری از محققان درصدد برآمدند تا عملکرد مدل وی را ارتقا دهند. یکی از اصلاحات انجام شده روی مدل گایج، تقسیم کردن بدن به 16 بخش مختلف توسط کاینکلی و همکارانش [5] می‌باشد. بعدها، این مدل به مدل 16 بخشی گایج مشهور شد. علاوه بر این، امیدوار و افرا [6] سازوکارهای مختلف برای انتقال انرژی و رطوبت در لباس را بررسی کردند و مدل گایج را برای پیش‌بینی احساس حرارتی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن اصلاح نمودند. همچنین، ذوالفقاری و معرفت [7]، 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. همانطور که گفته شد، در مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی، لباس به صورت یک پوشش یکدست روی تمام بدن مدلسازی می‌شود. بر همین اساس، این مدل‌ها یک شاخص احساس حرارتی کلی برای کل بدن به دست می‌آورند. از سوی دیگر، تحقیقات نشان داده است که به دلیل نقش تعیین کننده لباس در تبادل حرارت میان بدن و محیط، احساس حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن بطور چشمگیری با یکدیگر متفاوت است. ذوالفقاری و معرفت [7]، بدون استفاده از مدلسازی‌های پیچیده و ضمن حفظ سادگی ساختار مدل‌های استاندارد، مدلی سه نقطه‌ای (هسته بدن، پوست پوشیده شده با لباس، پوست فاقد پوشش) به منظور ارزیابی احساس بحرانی افراد ارائه کردند و در قالب آن، کاستی مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی در مورد مدلسازی لباس تا حدی بر طرف گردید.

با این وجود، یکی دیگر از نواقص مدلسازی‌های انجام پذیرفته، در نظر نگرفتن خصوصیات فردی است که می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تنظیم حرارتی بدن داشته باشد. تفاوت در سن، جنسیت، ساختار بدنی و متابولیک پایه افراد مختلف می‌تواند بر دمای بدن و همچنین میزان مصرف انرژی فرد تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد [8]. بر این اساس، لزوم دستیابی به یک مدل آسایش حرارتی فردی با ساختاری نسبتاً ساده و قابل استفاده برای مهندسان به شدت احساس می‌شود. در سال 1990، هاونیس و همکارانش [9] 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. تحقیقات ایشان نشان داد که درصد چربی بدن و مساحت کل بدن بیشترین تأثیر را در بین پارامترهای فردی دارند. همچنین هاونیس نشان داد که دمای مرکز بدن، دمای پوست و

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

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

که زیرنویس‌های br و cl به ترتیب بیانگر بخش‌های لخت و پوشیده بدن هستند. همچنین λ نسبت سطح بخش‌های لخت A_{br} به سطح کل بدن A_D است که سطح کل بدن از رابطه زیر بدست می‌آید [3].

$$A_D = 0.202m^{0.425}l^{0.725} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{A_{br}}{A_D} \quad (5)$$

و همچنین μ نسبت جرم بخش‌های لخت بدن (m_{br}) به جرم کل بدن (m) می‌باشد.

$$\mu = \frac{m_{br}}{m} \quad (6)$$

که مقادیر مربوط به λ و μ با توجه به کسر سطحی و جرمی مشخص شده برای بخش‌های مختلف بدن، قابل محاسبه می‌باشد [23]. از طرف دیگر، نرخ ذخیره انرژی در هر یک از بخش‌های مرکزی، پوست لخت و پوست پوشیده بایستی با نرخ افزایش انرژی داخلی آنها برابر باشد. بنابراین:

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha)mC_{p,b}dT_{cr}}{A_D \frac{dt}{dt}} \quad (7)$$

$$S_{sk,br} = \frac{\mu\alpha mC_{p,b}dT_{sk,br}}{\lambda A_D \frac{dt}{dt}} \quad (8)$$

$$S_{sk,cl} = \frac{(1-\mu)\alpha mC_{p,b}dT_{sk,cl}}{(1-\lambda)A_D \frac{dt}{dt}} \quad (9)$$

کل اتلاف حرارتی محسوس (جابه‌جایی و تابش) از پوست لخت برابر است با:

$$Q_{conv,br} + Q_{rad,br} = h_c(T_{sk,br} - T_a) + f_r h_r(T_{sk,br} - \bar{T}_r) \quad (10)$$

همچنین برای اتلاف حرارتی از پوست پوشیده خواهیم داشت:

$$Q_{sk,cl-cl} = \frac{T_{sk,cl} - T_{cl}}{R_{cl}} \quad (11)$$

از طرف دیگر، کل اتلاف حرارتی از پوست پوشیده باید با کل اتلاف حرارتی جابه‌جایی و تابشی از دست رفته در سطح لباس برابر باشد. بنابراین:

$$Q_{sk,cl-cl} = Q_{conv,cl} + Q_{rad,cl} = f_{cl}[f_r h_r(T_{cl} - \bar{T}_r) + h_c(T_{cl} - T_a)] \quad (12)$$

سیگنال‌های حرارتی بدن باید با توجه به رفتارهای افراد در تنظیم حرارتی بدن شبیه سازی شود، در مدل سه نقطه‌ای سیگنال‌های گرم و سرد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$WSIG_{cr} = \max(0, T_{cr} - T_{cr,n}) \quad (13)$$

$$CSIG_{cr} = \max(0, T_{cr,n} - T_{cr}) \quad (14)$$

$$WSIG_{sk,br} = \max(0, T_{sk,br} - T_{sk,n}) \quad (15)$$

$$CSIG_{sk,br} = \max(0, T_{sk,n} - T_{sk,br}) \quad (16)$$

$$WSIG_{sk,cl} = \max(0, T_{sk,cl} - T_{sk,n}) \quad (17)$$

$$CSIG_{sk,cl} = \max(0, T_{sk,n} - T_{sk,cl}) \quad (18)$$

$$WSIG_{sk,ov} = \max(0, T_{sk,ov} - T_{sk,n}) \quad (19)$$

$$CSIG_{sk,ov} = \max(0, T_{sk,n} - T_{sk,ov}) \quad (20)$$

که زیرنویس ov مربوط به شرایط کل پوست بدن است. همچنین دمای کل پوست بدن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_{sk,ov} = \lambda T_{sk,br} + (1-\lambda)T_{sk,cl} \quad (21)$$

بر اساس سیگنال‌ها جدید، عوامل فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن مانند دبی جریان خون میان پوست و مرکز بدن، نرخ تعرق و میزان لرز در مدل سه نقطه‌ای محاسبه می‌شود. دبی جریان خون میان پوست و مرکز بدن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

فردی در طراحی ساختمان‌ها در نظر گرفته شود، چون شرایط درک حرارتی برای گروه‌های مختلف از قبیل بچه‌ها، مردان و زنان، افراد مسن، بیماران تحت درمان و ... تفاوت دارد.

همانطور که اشاره شد مدل‌های ساده و استاندارد ارایه شده، به علت آنکه پارامترهای فردی در آن‌ها لحاظ نشده است دارای محدودیت‌هایی در کاربرد می‌باشند. از طرف دیگر مدل‌های فردی و موضعی توسعه یافته دارای ساختاری بسیار پیچیده هستند. در این مقاله، اثر مدلسازی عوامل فردی بر پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن و احساس حرارتی بررسی می‌شود و مدل سه نقطه‌ای گایج برای تبدیل به مدلی فردی با ساختاری ساده اصلاح می‌گردد.

2- مدل سه نقطه‌ای

در پژوهش ذوالفقاری و معرفت [7]، بدن انسان بر مبنای یک دیدگاه کل‌نگر به سه بخش پوست لخت، پوست پوشیده و بخش مرکزی تقسیم می‌شود. به این ترتیب بخشی از حرارت تولید شده توسط متابولیک در بخش مرکزی بدن، از طریق اتلافات تنفسی به محیط منتقل می‌شود و بخش دیگر آن از طریق پوست با محیط تبادل حرارت می‌کند. شایان ذکر است که به دلیل تفکیک شرایط حرارتی برای پوست لخت و پوست پوشیده، در مدل جدید باید معادلات موازنه انرژی و همچنین سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت برای هر یک از این بخش‌ها بطور مجزا در نظر گرفته شود. در شکل 1 شمایی کلی از مدل سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

2-1- معادلات حاکم

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

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

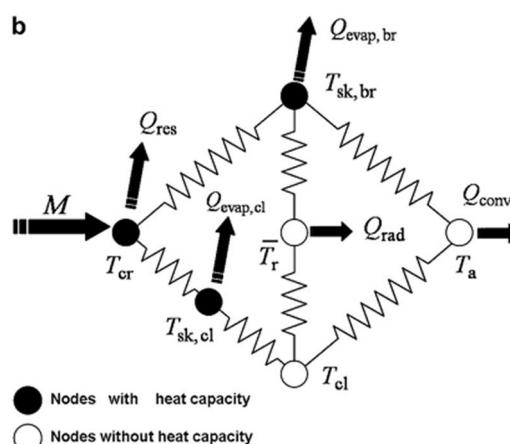
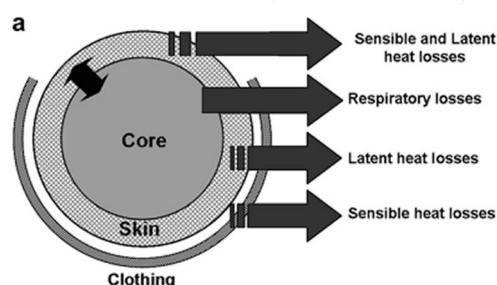


Fig. 1 The schematic for 3-node model. (a) Body heat transfer mechanism (b) thermal resistance network [7].

شکل 1 شمایی از مدل سه نقطه‌ای، (a) سازوکارهای انتقال حرارت حاکم بر آن (b) شبکه مقاومت حرارتی [7].

گرمایشی سالیانه را کاهش داد [24]. مدل‌های آسایش حرارتی رایج و استاندارد، فقط دو عامل فردی سطح فعالیت و نوع پوشش را به عنوان پارامترهای فردی ورودی به مدل در نظر می‌گیرند و از تأثیر عواملی از قبیل سن، جنسیت و تناسب بدنی افراد صرف‌نظر می‌کنند. بنابراین ضرورت توسعه یک مدل آسایش حرارتی ساده ولی منطبق با واقعیت فیزیولوژیکی بدن که تأثیرات پارامترهای فردی در آن در نظر گرفته شده باشد کاملاً احساس می‌شود. برای در نظر گرفتن تأثیر عوامل فردی در مدل، ابتدا باید 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 دست پیدا کرد و با استفاده از این پارامترها، معادلات حاکم را در جهت ارائه یک مدل فردی، تصحیح کرد. حال با داشتن خواص فیزیولوژیکی فردی مورد نیاز، معادلات بازنویسی می‌شود و ضرایبی همچون ضریب هدایتی و ظرفیت گرمایی ویژه با توجه به شرایط فرد (ضخامت لایه چربی، ضخامت لایه ماهیچه‌ای و ...) مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

3-1- تأثیر عوامل فردی

عوامل فردی می‌توانند در سه بخش اصلی، مربوط به انتقال حرارت بدن با محیط (سیستم غیر فعال¹)، سازوکارهای تنظیم حرارتی بدن (سیستم فعال²) و پاسخ حسگرهای حرارتی تأثیرات خود را در مدل‌های تنظیم حرارتی ایجاد کنند (شکل 2).

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، انتقال حرارت در بدن شامل دو سیستم مختلف می‌باشد، که یکی شامل انتقال حرارت بین پوست بدن با محیط و همچنین انتقال حرارت بین مرکز بدن با پوست بدن می‌باشد که از طریق سازوکارهای هدایت، جابه‌جایی، تبخیر و تابش صورت می‌پذیرد (سیستم غیرفعال) و دیگری انتقال حرارت ناشی از عوامل تنظیم حرارت بدن از جمله لرز، تعرق، انقباض و انقباض عروق (سیستم فعال) می‌باشد [25].

در بیان آسایش حرارتی، کلیه افراد را می‌توان با استفاده از چهار خصوصیت مستقل شاخص توده بدنی (BMI³)، سن، جنسیت و میزان سوخت و ساز پایه (BMR⁴) از یکدیگر مجزا نمود. همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است، به کمک خصوصیات فردی مستقل، عوامل تأثیرگذار فردی وابسته

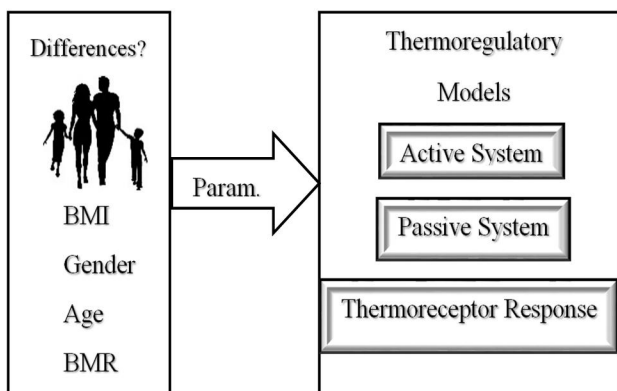


Fig. 2 The schematic for modeling individual characteristics

شکل 2 شمایی کلی از چگونگی مدل کردن خصوصیات فردی

¹ Passive System

² Active System

³ Body Mass Index

⁴ Basal Metabolic Rate

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200WSIG_{cr}}{3600(1 + 0.5CSIG_{sk,ov})} \quad (22)$$

علاوه بر این، نرخ تعرق از طریق سازوکار تنظیم حرارت بدن بر روی بخش‌های لخت و پوشیده‌ی بدن را می‌توان از روابط زیر بدست آورد:

$$\dot{m}_{rs,br} = 4.7 \times 10^{-5} WSIG_b \exp\left(\frac{WSIG_{sk,br}}{10.7}\right) \quad (23)$$

$$\dot{m}_{rs,cl} = 4.7 \times 10^{-5} WSIG_b \exp\left(\frac{WSIG_{sk,cl}}{10.7}\right) \quad (24)$$

که

$$WSIG_b = \max(0, T_b - T_{b,n}) \quad (25)$$

و از طرفی:

$$T_b = \alpha T_{sk,ov} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (26)$$

همچنین، افزایش نرخ متابولیک بدن در اثر لرز از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$M_{shiv} = \lambda M_{shiv,br} + (1 - \lambda) M_{shiv,cl} \quad (27)$$

که

$$M_{shiv,br} = 19.4 CSIG_{sk,br} CSIG_{cr} \quad (28)$$

$$M_{shiv,cl} = 19.4 CSIG_{sk,cl} CSIG_{cr} \quad (29)$$

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

$$TSENS_{br} = \begin{cases} 0.4685(T_{b,br} - T_{b,c}) & , T_{b,br} < T_{b,c} \\ 0.47\eta_{e,br}(T_{b,br} - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}), T_{b,c} \leq T_{b,br} \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_{e,br} + 0.685(T_{b,br} - T_{b,h}) & , T_{b,h} < T_{b,br} \end{cases} \quad (30)$$

$$TSENS_{cl} = \begin{cases} 0.4685(T_{b,cl} - T_{b,c}) & , T_{b,cl} < T_{b,c} \\ 0.47\eta_{e,cl}(T_{b,cl} - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}), T_{b,c} \leq T_{b,cl} \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_{e,cl} + 0.685(T_{b,cl} - T_{b,h}) & , T_{b,h} < T_{b,cl} \end{cases} \quad (31)$$

$$TSENS_{ov} = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & , T_b < T_{b,c} \\ 0.47\eta_e(T_b - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}), T_{b,c} \leq T_b \leq T_{b,h} \\ 0.47\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) & , T_{b,h} < T_b \end{cases} \quad (32)$$

که داریم:

$$T_{b,br} = \alpha T_{sk,br} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (33)$$

$$T_{b,cl} = \alpha T_{sk,cl} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (34)$$

$$T_{b,c} = 0.194(M - W) + 36.301 \quad (35)$$

$$T_{b,h} = 0.347(M - W) + 36.669 \quad (36)$$

مدل سه نقطه‌ای قادر است که احساس حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن را به صورت مجزا مورد ارزیابی قرار دهد. بر این مبنا، از میان احساس حرارتی بخش لخت و احساس حرارتی بخش پوشیده هر کدام که انحراف بیشتری نسبت به شرایط حرارتی خنثی (صفر) داشته باشد، باید به عنوان شاخص احساس حرارتی بحرانی بدن در نظر گرفته شود و این شاخص مبنای طراحی حرارتی محیط قرار گیرد.

3- توسعه مدل

امروزه به علت نیاز به پیش‌بینی بهتر شرایط آسایش فردی و همچنین با توسعه سیستم‌های تهویه انفرادی، نیاز به مدلی که بتواند شرایط حرارتی افراد را با در نظر گرفتن وابستگی به عوامل فردی مورد ارزیابی قرار دهد، شدیداً احساس می‌شود. در حال حاضر فرآیند طراحی و کنترل این نوع سیستم‌ها با استفاده از مدل‌های موجود، بدون در نظر گرفتن عوامل فردی انجام می‌پذیرد که فاقد دقت کافی می‌باشد. در مراجع مختلف بیان شده است که می‌توان با استفاده مناسب از سیستم‌های تهویه فردی تا 40% مصرف انرژی سرمایشی و

مدلسازی شده و نقش آن‌ها در هر بخش از معادلات ارزیابی می‌شود. سپس، عوامل فردی و خصوصیات فیزیولوژیکی فرد در ساختار مدل اعمال شده و معادلات بازنویسی می‌شود.

2-3- مدلسازی عوامل فردی

شاخص توده بدنی، سنجشی آماری برای مقایسه وزن و قد یک فرد است [26]. از این شاخص برای تفکیک افراد از لحاظ بدنی در مدلسازی استفاده می‌شود، شاخص توده بدنی از طریق تقسیم وزن فرد (کیلوگرم) بر توان دوم قد (متر) بدست می‌آید و رابطه آن چنین است:

$$BMI = \frac{m}{l^2} \quad (37)$$

در اکثر مدل‌های رایج، شرایطی به عنوان حالت استاندارد در نظر گرفته شده و از لحاظ کردن خصوصیات فردی صرف‌نظر می‌شود. این شرایط استاندارد عبارتند از: قد 1.83، وزن 75 کیلوگرم، درصد چربی 15٪، سطح تماس بدن 1.97 متر مربع، میزان سوخت و ساز پایه 87 وات و جنسیت مرد. 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 بدست آوردن میزان درصد چربی بدن، رابطه زیر ارائه شده است که تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد [27]:

$$BF = c_{bf,b} \cdot BMI + c_{bf,a} \cdot \text{age} + c_{bf,0} \quad (38)$$

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:

$$C_{p,b} = \left(\frac{\text{fat mass}}{m}\right)C_{b,\text{fat}} + \left(\frac{m - \text{fat mass}}{m}\right)C_{b,\text{other}} \quad (39)$$

برای محاسبه انتقال حرارت از طریق سازوکار هدایت، نیاز است تا مقاومت حرارتی بین مرکز بدن تا پوست را داشته باشیم. مقاومت حرارتی میان پوست و مرکز بدن، متأثر از پارامترهای فردی مانند میزان فعالیت و ضخامت لایه چربی بدن است که با رابطه زیر بیان می‌شود [11]:

$$R_{\text{core-skin}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{\text{skin blood flow}}} + \frac{1}{R_{\text{muscle}} + R_{\text{fat+skin}}}\right)} \quad (40)$$

که

$$R_{\text{muscle}} = \frac{0.05}{1 + \left(\frac{\text{Met} - 65}{130}\right)} \quad (41)$$

$$R_{\text{skin blood flow}} = \frac{1}{\eta \cdot C_{p,bl} \cdot \dot{m}_{bl}} \quad (42)$$

$$R_{\text{fat+skin}} = 0.0048(\delta_{\text{fat+skin}} - 2) + 0.0044 \quad (43)$$

که R مقاومت حرارتی ($\text{m}^2\text{K/W}$)، η 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 $\delta_{\text{fat+skin}}$ ضخامت لایه چربی (mm) است. برای بدست آوردن ضخامت لایه چربی خواهیم داشت:

$$\delta_{\text{fat+skin}} = 0.5 \cdot ASF \quad (44)$$

که ASF مقدار متوسط چین پوستی¹ فرد می‌باشد. تعیین این پارامتر به عنوان ورودی به مدل برای افراد مختلف چندان در دسترس نمی‌باشد. بنابراین باید به روش غیر مستقیم و با کمک گرفتن از چگالی و میزان چربی

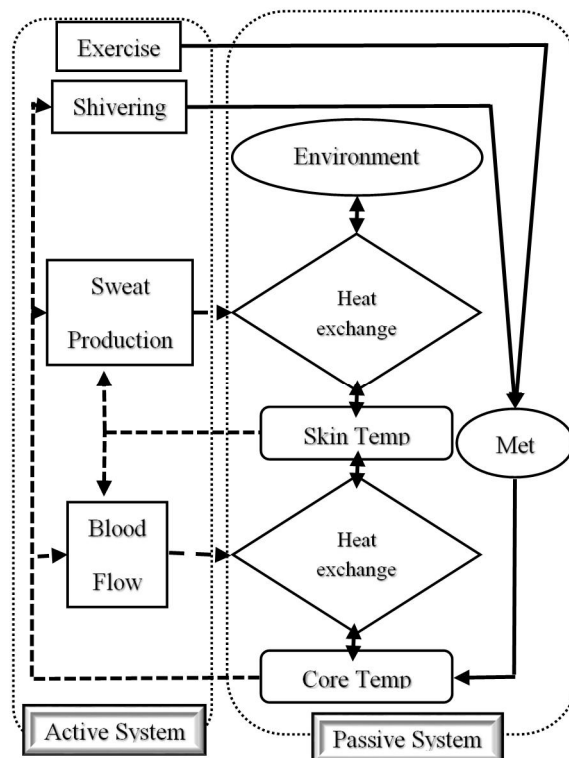


Fig. 3 Human body thermoregulation by active and passive systems [25]

شکل 3 شمایی از چگونگی تنظیم حرارتی بدن با دو سیستم قابل تفکیک فعال و غیر فعال [25]

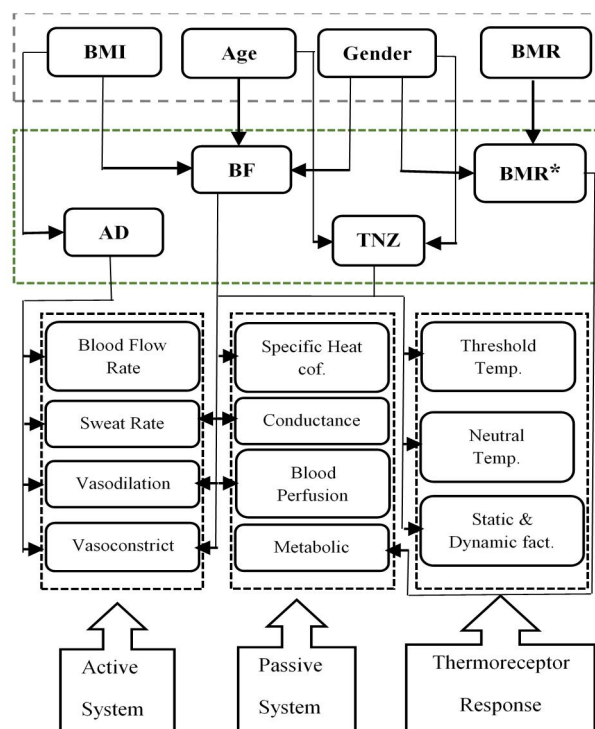


Fig. 4 Schematic diagram for individual parameters and their affection, BF = Body fat percentage, TNZ = Thermal neutral zone, BMR* = Modified basal metabolic rate

شکل 4 نمودار بلوکی مربوط به عوامل فردی مستقل و چگونگی تأثیرگذاری آن‌ها در مدل که، BF میزان درصد چربی بدن، TNZ محدوده دمایی خنثی و BMR^* نرخ متابولیک اصلاح شده.

¹ Skinfold

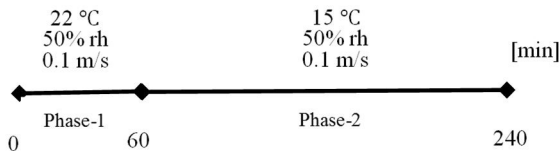


Fig. 5 Lichtenbelt et al. experiment [30] schedule.

شکل 5 شرایط محیطی و زمانبندی آزمایش لیچنبلت و همکاران [30]

در شکل 6 نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل سه نقطه‌ای برای دمای پوست پوشیده، پوست لخت و مرکز بدن را در مقایسه با دماهای اندازه‌گیری شده از پوست سینه، پوست دست و مرکز بدن برای یک زن با خصوصیات فردی مشخص نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل سه نقطه‌ای با وجود سادگی ساختاری، توانسته است جواب قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی داشته باشد. البته از آنجایی که در این مقایسه از داده‌های تجربی مربوط به دست به عنوان بخش لخت بدن استفاده شده است و با توجه به اینکه معمولاً دمای دست در هنگام سرما به دلایل شرایط فیزیولوژیکی و خون‌رسانی از متوسط دمای بخش لخت بدن کمتر است، لذا نتایج تجربی در این حالت نسبت به مدل سه نقطه‌ای مقادیر پایین‌تری دارند. حال برای اعتبار سنجی مدل فردی شده، در شکل 7 همین مورد برای دمای میانگین پوست بین مدل توسعه یافته، مدل سه نقطه‌ای، مدل گایج و نتایج تجربی با هم مقایسه می‌شود. مشاهده می‌شود که مدل فردی توسعه یافته در تحقیق حاضر توانسته است بعد از یک ساعت که فرد مورد نظر در محیط سرد قرار می‌گیرد، خود را با واقعیت فیزیولوژیکی فرد منطبق نماید. ضمناً فرد مورد مطالعه در این بررسی نسبت به استاندارد که در مدل‌های رایج استفاده می‌شود، دارای دو تفاوت فردی آشکار می‌باشد، اولاً وزن فرد کمتر بوده و ثانیاً جنسیت او زن بوده است. از سوی دیگر، نتایج تحقیقات تجربی نشان داده است که در شرایط مواجهه با سرما، افراد چاق نسبت به افراد لاغر رفتاری کندتر از خود بروز می‌دهند [31]، که نتایج مدل جدید بر این واقعیت صحت می‌گذارد. از طرف دیگر در پژوهش‌های متعددی نشان داده شده است که دمای پوست زن‌ها از مردها کمتر بوده و به دمای محیط حساس‌تر هستند [32] که این امر نیز با نتایج بدست آمده از مدل فردی مطابقت دارد.

برای بررسی چگونگی عملکرد مدل فردی تحقیق حاضر در شرایط محیطی متفاوت، نتایج حاصل از این مدل فردی را با نتایج تجربی تاکادا و همکارانش که در دو پژوهش متفاوت، در شرایط محیطی تقریباً یکسان، یکی برای متوسط افراد تحت آزمایش (آزمایش اول) و دیگری برای 4 فرد تحت آزمایش به صورت جداگانه (آزمایش دوم) گزارش کرده‌اند، مقایسه شده‌است [34,33]. برای این منظور ابتدا در شکل 8 نتایج مدل سه نقطه‌ای ساده و مدل گایج به همراه نتایج تجربی حاصل از میانگین افراد تحت آزمایش اول که در شکل 9 زمانبندی و شرایط محیطی طراحی این پژوهش آورده شده است، نشان داده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل سه نقطه‌ای در دو مرحله‌ای که دما کاهش و افزایش پیدا می‌کند و دوباره به حالت اولیه باز می‌گردد، توانسته به نتایج قابل قبولی دست پیدا کند. حال با اندکی تفاوت در زمانبندی آزمایش (مطابق شکل 10) و با حفظ شرایط کلی آزمایش قبلی، نتایج برای دو فرد تحت آزمایش به صورت جداگانه بررسی می‌شود. مشخصات افرادی که در آزمایش دوم شرکت کرده‌اند در جدول 2 آورده شده است. برای بررسی بهبود در مدل فردی توسعه یافته، دمای پوست دو نفر B و D در طول زمان آزمایش در شکل‌های 11 و 12 با نتایج تجربی حاصل شده از پژوهش تاکادا و مدل سه نقطه‌ای مقایسه می‌شود.

بدن، این مقدار را بدست آورد. همانطور که مشاهده می‌شود رابطه‌ای بین چگالی بدن افراد با میزان درصد چربی بدن آنها وجود دارد:

$$BF = \left[\frac{4.95}{D} - 4.50 \right] \cdot 100 \quad (45)$$

از طرف دیگر، روابط زیر برای محاسبه چگالی بدن مردان و زنان بر حسب SF یا مجموع هفت چین پوستی¹ (قفسه سینه، وسط زیر بغل، ماهیچه سه سر، کتف، شکم، پهلوی و ران) و سن افراد ارائه شده است [28]. برای مردان:

$$D_m = 1.112 - 10^{-6}(434.99 SF + 0.55 SF^2 - 288.26 \text{ age}) \quad (46)$$

و برای زنان:

$$D_f = 1.097 - 10^{-6}(469.71 SF + 0.56 SF^2 - 128.28 \text{ age}) \quad (47)$$

بنابراین می‌توان با بدست آوردن ضخامت لایه چربی، مقاومت حرارتی آن قسمت را نیز محاسبه کرد و ضریب انتقال حرارت را با توجه به خصوصیات فردی تصحیح کرد.

در مدل سه نقطه‌ای برای تعیین کسر تجمع جرمی در ناحیه پوست (α) از میزان دبی جریان خون استفاده می‌شود، حال با داشتن مقاومت حرارتی بین مرکز بدن تا پوست می‌توان این پارامتر را که نقش مهمی در تعیین دمای ایفا می‌کند در ساختار مدل اصلاح نمود [29].

$$\alpha = 0.08 + 2 R_{\text{core-skin}} \quad (48)$$

باید توجه داشت که پارامترهایی از قبیل نرخ تعرق و دبی جریان خون مستقیماً متأثر از سطح بدن افراد می‌باشد، که در مدل اصلاح شده این عوامل به صورت خطی با مساحت بدن فرد به مساحت بدن استاندارد $\left(\frac{A_D}{A_{D-\text{standard}}} \right)$ مدلسازی شده‌اند.

4- بحث و بررسی نتایج

در این بخش به بررسی تأثیر مدل فردی سه نقطه‌ای پرداخته می‌شود و برای ارزیابی چگونگی بهبود مدل با در نظر گرفتن خصوصیات افراد، نتایج برآمده از مدل فردی با نتایج تجربی و مدل‌های دیگر مقایسه می‌گردد.

در ابتدا و به منظور اعتبارسنجی مدل توسعه یافته در این مقاله، نتایج حاصل از این مدل با نتایج تجربی انجام شده توسط لیچنبلت و همکارانش [30] مقایسه شده است. ایشان در بخشی از تحقیق خود، آزمایشی طراحی کردند که زمان‌بندی آن و شرایط محیطی آزمایش در شکل 5 نشان داده شده است. همچنین ایشان برای تحقیق خود از 10 مرد و 10 زن که در سلامت کامل بودند و خصوصیات فردی آنها در جدول 1 آمده است، خواستند که در این آزمایش شرکت کنند. پوشش افراد در حال آزمایش 0.7clo بوده و صورت، دست‌ها و مچ پای افراد بدون پوشش در نظر گرفته شده است. در این آزمایش که تحت شرایط کنترل شده انجام شده است، در هر مرحله، دمای بخش‌های مختلف پوست و مرکز بدن افراد در بازه‌های زمانی 50 ثانیه‌ای با استفاده از ابزارهای دقیق ثبت و گزارش شده است.

جدول 1 اطلاعات افراد تحت آزمایش

Table 1 Information about subjects.			
مشخصه	میانگین	بیشترین	کمترین
(10 مرد و 10 زن)	($\pm$ انحراف معیار)		
سن (years)	30	36	19
وزن (kg)	71.1 $\pm$ 14.4	107.2	51.2
قد (m)	1.74 $\pm$ 0.09	1.55	1.85
درصد چربی بدن (%)	22.5 $\pm$ 8.4	36	8.2

¹ Sum of seven skinfold

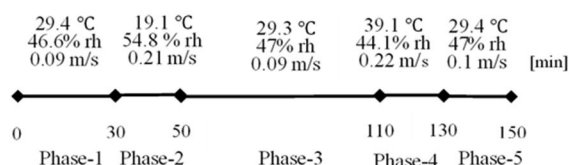


Fig. 9 Munir and Takada et al. experiment [34] schedule. (experiment 1)

شکل 9 شرایط محیطی و زمانبندی آزمایش مونیر، تاکادا و همکارانش [34]. (آزمایش 1)

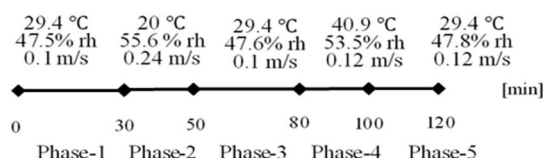


Fig. 10 Takada et al. experiment [33] schedule. (experiment 2)

شکل 10 شرایط محیطی و زمانبندی آزمایش تاکادا و همکارانش [33]. (آزمایش 2)

جدول 2 اطلاعات افراد تحت آزمایش [33].

Table 2 Information about subjects [33].

D	C	B	A	مشخصه (4 مرد)
24	24	24	25	سن (years)
76.8	54.8	66.0	55.6	وزن (kg)
1.74	1.63	1.67	1.69	قد (m)
1.89	1.59	1.73	1.64	مساحت بدن (m ²)

همانطور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، از آنجایی که خصوصیات فردی نفر B نزدیک به مبنای مشخصات مورد استفاده در مدل‌های استاندارد می‌باشد، نتایج حاصل از مدل سه نقطه‌ای و مدل توسعه یافته با نتایج تجربی تا حد قابل قبولی مطابقت دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل فردی در زمان کاهش و افزایش دما، نشان می‌دهد که به صورت دقیق‌تری نسبت به مدل سه نقطه‌ای ساده می‌تواند دمای پوست فرد را پیش‌بینی کند. از طرف دیگر با بررسی شکل 12 برای پیش‌بینی دمای پوست نفر D نشان می‌دهد که از آنجا که وزن و قد فرد مورد نظر بیشتر می‌باشد، مدل سه نقطه‌ای کماکان نتایج قبلی را نشان می‌دهد، در صورتی که با توجه به نتایج تجربی بدست آمده واکنش این فرد در کاهش دما کندتر نسبت به نفر B می‌باشد. با توجه به مدل‌سازی فردی انجام گرفته در این مقاله، نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند اختلاف دمای در حدود 1 درجه سلسیوس را که بین نتایج تجربی و مدل سه نقطه‌ای وجود دارد به 0.1 درجه سلسیوس کاهش دهد. از طرفی می‌توان نشان داد، با استفاده از مدل توسعه یافته در شرایط محیطی ناپایا، میانگین خطا در پیش‌بینی دمای پوست برای فرد نسبت به داده‌های تجربی از 1.2 درجه سلسیوس در مدل سه نقطه‌ای به 0.4 درجه سلسیوس تقلیل می‌یابد.

برای بررسی عملکرد و اعتبارسنجی مدل توسعه یافته، در تفکیک جنسیتی افراد از نتایج تجربی پژوهش اویجن و همکارانش بهره گرفته می‌شود [8]. ایشان آزمایشی مانند شرایط لیچتبلت طراحی کردند، با این تفاوت که دمای محیط در مرحله دوم 16 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است و نتایج گزارش شده از دمای مرکز بدن و دمای پوست، مقدار متوسط‌گیری شده از دماهای بدست آمده در نیم ساعت آخر هر مرحله از آزمایش می‌باشد.

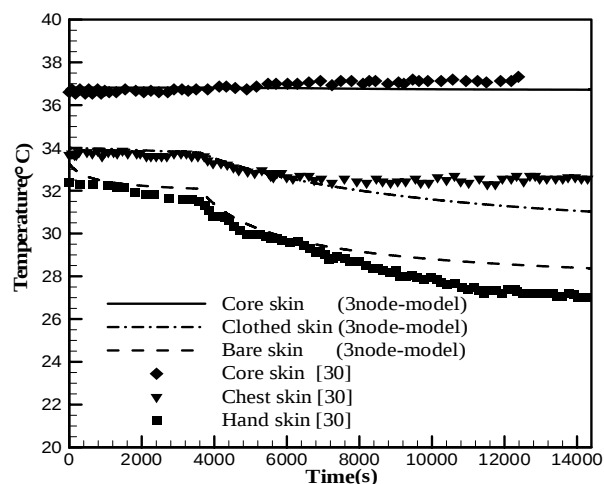


Fig. 6 Comparison of measured temperature from one female subject [30] and simulated temperature by 3 node-model.

شکل 6 مقایسه دماهای تجربی [30] بدست آمده با شبیه‌سازی مدل سه نقطه‌ای.

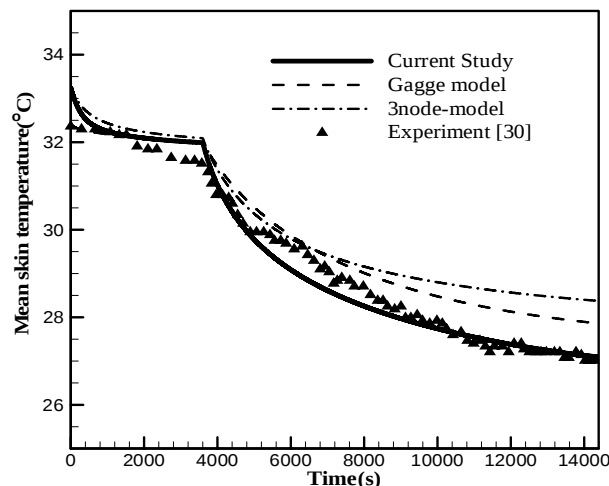


Fig. 7 Comparison of measured mean skin temperature from one female subject [30] and simulated mean skin temperature by Gagge model, 3node-model and current study.

شکل 7 مقایسه دمای پوست میانگین تجربی [30] با مدل گایج، مدل سه نقطه‌ای و مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر برای فرد مورد نظر.

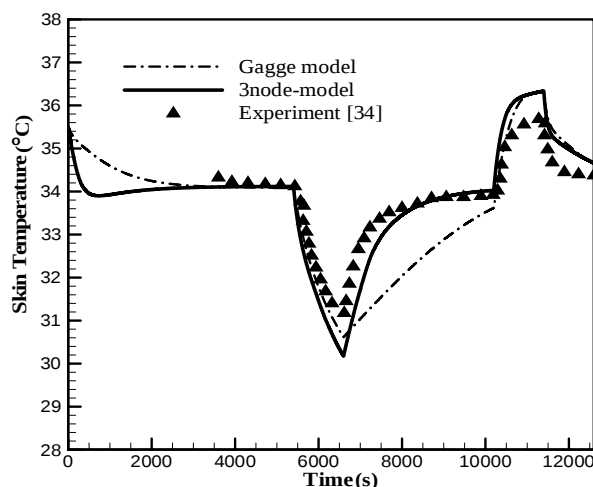


Fig. 8 Comparison of measured skin temperature [34] and simulated skin temperature by Gagge model and 3node-model.

شکل 8 مقایسه دمای پوست بدست آمده تجربی [34] با دمای پوست حاصل از شبیه‌سازی با مدل گایج و مدل سه نقطه‌ای.

جدول 3 اطلاعات افراد تحت آزمایش [8].

Table 3 Information about subjects [8].

مشخصه	مردها (12 نفر)	زن‌ها (13 نفر)
سن (years)	27±6	25±3
وزن (kg)	79.4±14.4	72.2±8.4
قد (m)	1.83±0.04	1.67±0.06
درصد چربی بدن (%)	16±8	27±7

جدول 4 مقایسه نتایج بدست آمده از مدل توسعه یافته با نتایج تجربی.

Table 4 Comparison of measured temperatures and current study.

		دمای میانگین		دمای پوست بدون		دمای مرکز	
		پوست		پوشش		بدن	
		(°C)		(°C)		(°C)	
		تجربی	مدل	تجربی	مدل	تجربی	مدل
22°C	مرد	32.0	32.3	31.4	31.6	36.8	36.6
	زن	32.2	32.4	30.7	30.3	36.9	37
16°C	مرد	30.9	30.5	27.6	27.5	36.5	36.6
	زن	30.4	30.8	25.5	25.0	36.8	37.1

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل سه نقطه‌ای که بر پایه مدل استاندارد گایچ برای رفع نواقص ساده‌سازی در پوشش افراد ارائه شده بود، برای در نظر گرفتن خصوصیات فردی در مدل‌سازی توسعه پیدا کرد. در مدل جدید توسعه یافته، خصوصیات فردی مستقل و در دسترس افراد مانند سن، وزن، قد و جنسیت به عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شده است. از طریق این خصوصیات، عوامل فردی تأثیرگذار همچون درصد چربی بدن، ظرفیت گرمایی ویژه بدن، مقاومت حرارتی بافت بدن و ... محاسبه می‌گردد و در معادلات مربوط به موازنه انرژی در مدل سه نقطه‌ای اصلاح می‌گردد. نتایج حاصل از مدل جدید، نشان می‌دهد که پیش‌بینی دقیق‌تری از دمای پوست و مرکز بدن در مقایسه با مدل‌های قبلی برای افراد مختلف صورت می‌پذیرد و این امر می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر احساس حرارتی بخش‌های مختلف بدن در مدل آسایش حرارتی سه نقطه‌ای منجر شود.

لازم به ذکر است که مدل ارائه شده توانسته به طور قابل قبولی واقعیت‌های فیزیکی و فیزیولوژیکی افراد را در نتایج نشان دهد. نتایج بهبود یافته از مدل حاکی از این واقعیت هستند که افراد با وزن بیشتر رفتاری کندتر نسبت به سرما از خود نشان می‌دهند و دمای میانگین پوست بین یک فرد چاق و لاغر در حدود 1.8 درجه سلسیوس می‌باشد، همچنین این اختلاف وزن در حدود 0.4 درجه سلسیوس اختلاف دما برای مرکز بدن ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، زن‌ها حساسیت بیشتری نسبت به سرما از خود نشان می‌دهند و اختلاف قد در افراد از میان دیگر خصوصیات فردی کمترین تأثیر را در تنظیم حرارتی بدن دارد.

به طور کلی می‌توان گفت مدل توسعه یافته اخیر، در عین حفظ سادگی مدل، می‌تواند اثرات خصوصیات فردی را نیز در تنظیم حرارتی بدن تا حد قابل قبولی بهبود بخشد.

در این پژوهش 13 زن و 12 مرد که در رده سنی 19 تا 36 سال قرار داشتند با خصوصیات فردی که در جدول 3 آمده است، شرکت کردند. بعد از شبیه‌سازی با استفاده از مدل فردی، نتایج در جدول 4 با نتایج تجربی مقایسه شده است. همانطور که نشان داده شده است، اختلاف بین نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده و نتایج تجربی گزارش شده بین 0.1 تا 0.5 درجه سلسیوس می‌باشد، که بیشترین اختلاف مربوط به دمای پوست بدون پوشش زن در مرحله 16 درجه سلسیوس می‌باشد. با مقایسه نتایج برای مردان و زنان، مجدداً می‌توان به حساسیت بیشتر زن‌ها در شرایط سرد نسبت به مردها صحت گذاشت.

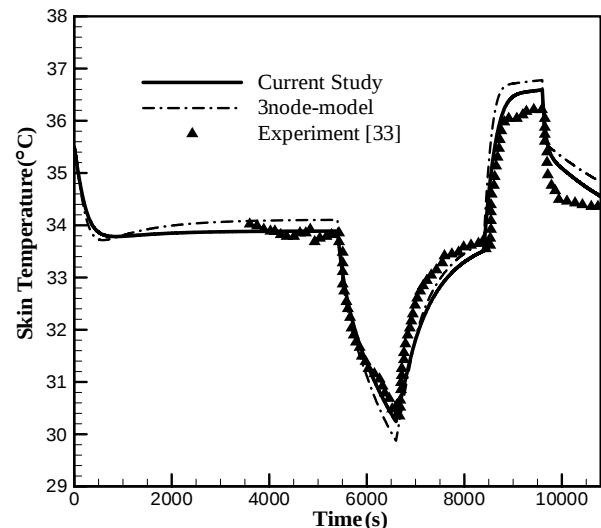


Fig. 11 Comparison of measured mean skin temperature (case B) [33] and simulated mean skin temperature by 3node-model and current study.

شکل 11 مقایسه دمای پوست میانگین تجربی [33] بدست آمده از فرد B تحت آزمایش با دمای میانگین پوست حاصل از شبیه‌سازی با مدل سه نقطه‌ای و مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر برای فرد B.

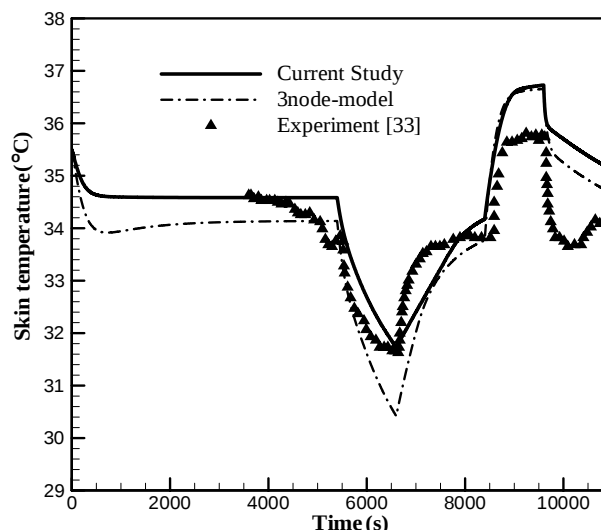


Fig. 12 Comparison of measured mean skin temperature (case D) [33] and simulated mean skin temperature by 3node-model and current study.

شکل 12 مقایسه دمای پوست میانگین تجربی [33] بدست آمده از فرد D تحت آزمایش با دمای میانگین پوست حاصل از شبیه‌سازی با مدل سه نقطه‌ای و مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر برای فرد D.

7- مراجع

- [1] P. O. Fanger, *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*, pp. 13-41, New York: McGraw-Hill, 1970.
- [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] ASHRAE, *ASHRAE handbook of fundamentals*, Atlanta, 2001.
- [4] ISO7730, *Moderate thermal environments—Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*: International Standards Organization, 1994.
- [5] O. Kaynakli, M. Kilic, Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions, *Building and Environment*, Vol. 40, No. 2, pp. 165-174, 2005.
- [6] A. Omidvar, B. afra, Evaluation of thermal and moisture inertia effects in clothing and gagge's model modification for body thermal sensation and physiological responses estimation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 167-175, 2014. (in Persian)
- [7] 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.
- [8] A. M. J. van Ooijen, W. D. van Marken Lichtenbelt, K. R. Westerterp, Individual differences in body temperature and the relation to energy expenditure: the influence of mild cold, *Journal of Thermal Biology*, Vol. 26, No. 4-5, pp. 455-459, 2001.
- [9] 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.
- [10] G. Havenith, J. M. L. Coenen, L. Kistemaker, W. L. Kenney, Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 77, No. 3, pp. 231-241, 1998.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] W. D. Van Marken Lichtenbelt, A. J. H. Frijns, D. Fiala, F. E. M. Janssen, A. M. J. Van Ooijen, A. A. Van Steenhoven, Effect of individual characteristics on a mathematical model of human thermoregulation, *Journal of Thermal Biology*, Vol. 29, No. 7-8, pp. 577-581, 2004.
- [15] 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.
- [16] S. Karjalainen, Thermal comfort and gender: A literature review, *Indoor Air*, Vol. 22, No. 2, pp. 96-109, 2012.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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, No. 3, pp. 143-159, 2001.
- [20] K. Katic, W. Zeiler, G. Boxem, Thermophysiological models: a first comparison, *proceedings of The fifth German-Austrian International Building Performance Simulation Association conference*, Aachen: Germany, pp. 595-602, 2014.
- [21] 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 thirteenth*

6- فهرست علائم

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

α	کسر تجمع گرمی در ناحیه پوست (بی بعد)
η	بازده (بی بعد)
λ	نسبت سطح بخش‌های لخت بدن (بی بعد)
μ	نسبت جرم بخش‌های لخت بدن (بی بعد)

زیرنویس‌ها

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

- Values for Body Composition and Anthropometric Measurements in Athletes, *PLoS ONE*, Vol. 9, No. 5, pp. e97846, 2014.
- [29] G. Havenith, D. Fiala, *Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress*, in: *Comprehensive Physiology*, pp. 255-302, John Wiley & Sons, 2011.
- [30] W. D. Van Marken Lichtenbelt, A. J. H. Frijns, A. M. J. Van Ooijen, D. Fiala, A. M. Kester, A. A. Van Steenhoven, Validation of an individualized model of human thermoregulation for predicting responses to cold air, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 51, No.3, pp. 169-179, 2007.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] S. Takada, H. Kobayashi, T. Matsushita, Thermal model of human body fitted with individual characteristics of body temperature regulation, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 3, pp. 463-470, 2009.
- [34] A. Munir, S. Takada, T. Matsushita, Re-evaluation of Stolwijk's 25-node human thermal model under thermal-transient conditions: Prediction of skin temperature in low-activity conditions, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 9, pp. 1777-1787, 2009.
- International Building Performance Simulation Association conference*, Chambéry: France, pp. 2305-2311, 2013.
- [22] R. Holopainen, A human thermal model for improved thermal comfort, PhD Thesis, VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.
- [23] S.-i. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki, M. Konishi, Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), *Energy and Buildings*, Vol. 34, No.6, pp. 637-646, 2002.
- [24] H. Zhang, E. Arens, D. Kim, E. Buchberger, F. Bauman, C. Huizenga, Comfort, perceived air quality, and work performance in a low-power task–ambient conditioning system, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 1, pp. 29-39, 2010.
- [25] G. Havenith, Interaction of clothing and thermoregulation, *Exogenous Dermatology*, Vol. 1, No. 5, pp. 221-230, 2002.
- [26] G. Eknayan, Adolphe Quetelet, the average man and indices of obesity, *Nephrology Dialysis Transplantation*, Vol. 23, No. 1, pp. 47-51, 2008.
- [27] 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.
- [28] D. A. Santos, J. A. Dawson, C. N. Matias, P. M. Rocha, C. S. Minderico, D. B. Allison, L. B. Sardinha, A. M. Silva, Reference