



معرفی یک مدل آسایش حرارتی جدید برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی در محیط‌های غیریکنواخت

نگین معلمی خیاوی¹، مهدی معرفت^{2*}، سید علیرضا ذوالفقاری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* تهران، صندوق پستی 111-14115، maerefat@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 خرداد 1396

پذیرش: 05 مرداد 1396

ارائه در سایت: 03 شهریور 1396

کلید واژگان:

آسایش حرارتی موضعی

آسایش حرارتی کلی

محیط غیریکنواخت

چکیده

مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی همچون مدل فنگر و گایج و دیگر مدل‌های آسایش حرارتی متداول، برای محیط‌های یکنواخت توسعه پیدا کرده و آسایش حرارتی کلی برای بدن را بر مبنای عوامل فردی و محیطی متوسط پیش‌بینی می‌نمایند و توانایی ارزیابی آسایش حرارتی موضعی را ندارند. در حالی که در محیط‌های غیریکنواخت، بخش‌های مختلف بدن محدوده‌های مختلفی از پارامترهای فیزیکی از جمله دمای هوا، دمای متوسط تابش و سرعت هوا را تجربه می‌کنند. بنابراین واکنش افراد به محیط غیریکنواخت بستگی به احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن آنها دارد نه به احساس حرارتی کل بدن. در حال حاضر، ارزیابی آسایش حرارتی در محیط‌های غیریکنواخت، بیشتر به صورت آزمایش‌های کنترل شده در محیط‌های خاص مثل محیط داخل اتومبیل بوده و مدل‌های ارائه شده، براساس تحلیل رگرسیون نتایج تجربی استوار بوده است که مختص شرایط فردی و محیطی مطابق با آزمایش‌های انجام شده می‌باشند. هدف از این مقاله ارائه یک مدل آسایش حرارتی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن و در نهایت ارزیابی احساس حرارتی کل بدن در محیط‌های غیریکنواخت می‌باشد. در مدل جدید، با استفاده از مدل فیزیولوژیکی و 16 بخشی تانابه، اثرات غیریکنواختی محیط لحاظ شده و دما و فرایندهای فیزیولوژیکی بخش‌های مختلف بدن محاسبه شده و سپس احساس حرارتی موضعی و کل بدن از طریق مدل دانشگاه برکلی ارزیابی می‌گردد. نتایج بدست آمده از مدل جدید با نتایج تجربی موجود مقایسه گردیده که حکایت از همخوانی مناسب نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

Introducing a new thermal comfort model for evaluation of local and overall thermal sensation in non-uniform environments

Negin Moallemi Khiavi¹, Mehdi Maerefat^{1*}, Seyed Alireza Zolfaghari²

1-Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

*P.O.B. 111-14115, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 June 2017

Accepted 27 July 2017

Available Online 25 August 2017

Keywords:

Local Thermal Sensation

Overall Thermal Sensation

Non-Uniform Environments

ABSTRACT

The standard and conventional thermal comfort models such as Gagge and Fanger models are only applicable in uniform thermal environments and predict the overall thermal sensation based on mean environmental and individual parameters and are not capable of evaluation of local thermal sensations of different body parts. But under non-uniform conditions, the human body's segments may experience a wide range of physical parameters such as air temperature, radiation temperature and air velocity. So the thermal response of the people to non-uniform conditions depends on local thermal sensation not on overall thermal sensation. Nowadays, thermal comfort in non-uniform environments may be predicted using experiments in the climate chambers or in automobiles and the proposed models are based on the regression analysis of the experimental data from different subjects in special conditions. So the purpose of this work is proposing a model for evaluation of local thermal sensation of different body segments and overall thermal sensation in non-uniform environments. In the new model, temperature and physiological mechanisms of different body parts are obtained by 16-segment Tanabe model and then the local and overall thermal sensations are evaluated by the University of Berkeley model. The comparison of obtained results by new model with available experimental data shows good agreement between them.

1- مقدمه

محیط‌های غیریکنواخت هستند. مثال‌های زیادی از چنین محیط‌هایی وجود دارد: اتاق‌هایی با سطوح گرم و یا سرد، وسایل نقلیه دارای تهویه هوای موضعی، محیط‌های هم جوار با دماهای مختلف و محیط‌های دارای

محیط‌های حرارتی اغلب غیریکنواخت و ناپایا هستند و در حالت کلی، تغییرات دمای هوا، دمای متوسط تابش و سرعت هوا مهم‌ترین دلایل

Please cite this article using:

N. Moallemi Khiavi, M. Maerefat, S. A. Zolfaghari, Introducing a new thermal comfort model for evaluation of local and overall thermal sensation in non-uniform environments, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 444-450, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

سیستم‌های تهویه انفرادی¹. ارزیابی آسایش حرارتی در چنین محیط‌هایی معمولاً کار پیچیده‌ای است و تحقیقات نشان داده است که واکنش افراد به محیط غیریکنواخت بستگی به احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن آن‌ها دارد نه به احساس حرارتی کل بدن آن‌ها.

مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی از جمله مدل‌های فنگر [1] و گایج [2] که برای بیش از 30 سال، به عنوان پرکاربردترین مدل‌های آسایش حرارتی برای ارزیابی احساس حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بر مبنای موازنه انرژی برای بدن بوده و برای شرایط یکنواخت توسعه پیدا کرده و احساس حرارتی کلی برای بدن را پیش‌بینی می‌نمایند و نمی‌توانند احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن را که مستلزم ارزیابی آسایش حرارتی در محیط‌های غیریکنواخت می‌باشد، ارزیابی کنند. در سال 2010، ذوالفقاری و معرفت [3] با معرفی یک مدل سه نقطه‌ای به اصلاح نحوه مدل‌سازی لباس مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی پرداختند به این ترتیب که به جای مدل‌سازی یکدست لباس بر روی تمام سطح بدن، شرایط حرارتی بخش‌های پوشیده و لخت بدن را به‌طور مجزا مورد ارزیابی قرار دادند. در مدل سه نقطه‌ای ذوالفقاری و معرفت [3]، بدن به سه بخش پوست لخت، پوست پوشیده و بخش مرکزی تقسیم شده و فرایندهای فیزیولوژیکی به‌طور مجزا برای این سه بخش ارزیابی شده است. در یک تحقیق دیگر، ذوالفقاری و معرفت [4]، یک مدل آسایش حرارتی زیست گرمایی برای ارزیابی پاسخ حرارتی حسگرهای پوستی در محیط‌های ناپایا ارائه کردند. به این ترتیب که تأثیر تغییرات دمای هسته و فرایندهای ترموفیزیولوژیکی بر دمای حسگرهای پوستی را در معادله زیست-گرمایی پنس [5]، لحاظ نمودند. در ادامه ذوالفقاری و معرفت [6] یک شاخص احساس حرارتی² منطبق با مقیاس حرارتی اشری [7] و بر مبنای پاسخ حسگرهای حرارتی پوستی ارائه نمودند. مدل ایشان به دلیل مبتنی بودن بر فیزیک واقعی درک حرارتی انسان، بر خلاف مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی توانایی پیش‌بینی پدیده کوران بر رفتار حرارتی بدن را دارد. مدل‌های ارائه شده توسط ذوالفقاری و معرفت [4,6,7]، علی‌رغم تفکیک لباس بین بخش‌های پوشیده و لخت و مبتنی بودن بر فیزیک واقعی درک حرارتی انسان، بر اساس پارامترهای محیطی و فردی متوسط یکنواخت هستند بنابراین برای محیط‌های یکنواخت و ناپایا جواب‌های قابل قبولی ارائه می‌دهند؛ اما نمی‌توانند اثرات محیط غیریکنواخت و توزیع نامتقارن لباس را بر احساس حرارتی افراد لحاظ کنند.

در سال‌های اخیر مدل‌های فیزیولوژیکی چند بخشی توسعه پیدا کرده‌اند که بدن را به بخش‌های مختلف تقسیم کرده و پارامترهای فردی، پارامترهای محیطی، خواص و فرایندهای فیزیولوژیکی متفاوتی برای بخش‌های مختلف بدن در نظر می‌گیرند، در نتیجه مدل‌های چند بخشی توانایی ارزیابی تأثیر تغییرات دمای هوا، سرعت هوا، دمای متوسط تابش و توزیع نامتقارن لباس بر دما و فرایندهای فیزیولوژیکی بخش‌های مختلف بدن را دارند؛ اما در نهایت شاخصی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و یا کلی ارائه نمی‌کنند. پایه‌گذار مدل‌های چند جزئی تفاضل محدود، استولویک [8] بوده است که بدن را به شش جزء استوانه‌ای شامل دست‌ها، پاها، تنه و سر تقسیم نموده است و هر قسمت دارای چهار لایه (هسته، ماهیچه، چربی و پوست) در جهت شعاعی می‌باشد. در این مدل، ارتباط قسمت‌های مختلف بدن از طریق جریان خون برقرار می‌شود. دیگر مدل‌های چند جزئی تفاضل محدود، بیشتر در راستای توسعه و اصلاح مدل استولویک [8] پایه‌گذاری شده‌اند که از آن

جمله می‌توان به مدل فیالا [9]، مدل سالوم و همکاران [10] و مدل تانابه [11] اشاره نمود. در هریک از مدل‌های ذکر شده بعضی از نقص‌های مدل استولویک برطرف شده است. مثلاً در مدل فیالا [9] بدن به بیست المان استوانه‌ای تقسیم شده و در آن، بدن دارای دو سیستم فعال و غیرفعال می‌باشد. مدل سالوم و همکاران [10] شامل تعداد جزء‌های افزایش یافته، افزودن گره لباس و اصلاح ضرایب انتقال حرارت همرفت و تشعشع می‌باشد. مدل تانابه [11] یک مدل 65 گرهی یک بعدی بوده که در آن بدن به 16 جزء تقسیم شده است. هر جزء شامل چهار لایه پوست، ماهیچه، چربی و هسته می‌باشد. گره 65م مربوط به خون می‌باشد که دارای تبادل حرارت از طریق همرفت با سایر گره‌ها می‌باشد. از مدل‌های چند بخشی ذکر شده می‌توان برای برآورد دما، انتقال حرارت و فرایندهای فیزیولوژیکی بخش‌های مختلف بدن در محیط غیریکنواخت استفاده نمود. اما نقص مدل‌های ذکر شده این است که شاخصی برای ارزیابی احساس حرارتی ارائه نکرده‌اند.

البته مدل‌هایی نیز برای پیش‌بینی و ارزیابی آسایش حرارتی در محیط‌های غیریکنواخت به‌صورت آزمایشگاهی توسعه پیدا کرده‌اند که شامل مدل‌های مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی و مدل دمای معادل³ [12] می‌باشند. از جمله مدل‌های مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی می‌توان به مدل ماتسونگا [13]، مدل کوهری [14]، مدل جونز و اوگاوا⁴ [15] و مدل هاگینو و هارا [16] اشاره نمود. در مدل ماتسونگا [13] که برای محیط داخل اتومبیل توسعه داده شده است از طریق میانگین‌گیری وزنی بر اساس سطح سه عضو بدن یک شاخص حرارتی برای کل بدن محاسبه شده است. نقص مدل ماتسونگا [13] این است که بخش‌های مختلف بدن دارای همان احساس حرارتی کل بدن هستند. در مدل کوهری [14] که برای یک شرکت اتومبیل‌سازی توسعه داده شده است، با استفاده از آدمک حرارتی و مدل گایج برای 11 عضو بدن، یک دمای موثر استاندارد به دست آمده است. به کار بردن مدل دو گرهی بدون در نظر گرفتن تبادل حرارتی بین قسمت‌های مختلف بدن به واسطه جریان خون و انتقال حرارت هدایت، یک نقص برای مدل کوهری [14] می‌باشد. در مدل جونز و اوگاوا [15] که در دانشگاه کانزاس توسعه یافته است برای رفع محدودیت مدل دو نقطه‌ای در ارزیابی محیط‌های نامتقارن، پوست و لباس به قسمت‌های خیلی کوچک تقسیم شده است. در این مدل نیز همانند مدل‌های قبلی انتقال حرارت بین قسمت‌های مختلف بدن به واسطه جریان خون در نظر گرفته نشده است. در مدل هاگینو و هارا [16] یک سری آزمایش برای یافتن رابطه‌ای میان احساس حرارتی کلی و احساس حرارتی موضعی اجزاء مختلف بدن در داخل اتومبیل انجام شده است. البته در رابطه‌ای که ارائه شده، فقط تأثیر احساس حرارتی قسمت‌هایی از بدن که بیشترین تأثیر را روی احساس حرارتی کلی دارند، در نظر گرفته شده است. مدل دمای معادل برای اولین بار برای بخش‌های موضعی بدن توسط ویون و همکاران [12] برای ارزیابی احساس حرارتی افراد در داخل وسایل نقلیه با استفاده از آدمک حرارتی معرفی شد. در این مدل، دو نمودار یکی برای محدوده دمایی قابل قبول در شرایط تابستانه و دیگری برای شرایط زمستانه ارائه شده است. همچنین، اخیراً یک مدل برای ارزیابی آسایش حرارتی موضعی تحت شرایط محیطی ناپایا و غیریکنواخت، توسط ژانگ و همکاران [17] در دانشگاه برکلی توسعه یافته است که به مدل دانشگاه برکلی⁵ معروف می‌باشد. این مدل، یک مدل ارزیابی احساس و آسایش حرارتی موضعی و

³ EHT(Equivalent Homogeneous Temperature)

⁴ KSU

⁵ UCB(Univesity of California, Berkely)

¹ Personalized Ventilation Systems

² TRESP

2-1- ارزیابی شرایط موضعی بدن توسط مدل 65 نقطه‌ای تانابه

مدل تانابه [11] یک مدل 65 نقطه‌ای می‌باشد که در آن، بدن به 16 جزء تقسیم شده است و هر جزء شامل چهار لایه پوست، ماهیچه، چربی و هسته می‌باشد. گره 65م مربوط به مخزن خون می‌باشد که دارای تبادل حرارت از طریق جریان خون با سایر گره‌ها می‌باشد. برای هر جزء بدن و برای هر چهار لایه اجزاء بدن، معادله موازنه انرژی نوشته شده است. در مدل تانابه، اندیس i بیانگر اجزاء بدن و اندیس j بیانگر لایه‌های اجزاء بدن می‌باشند. معادلات موازنه انرژی برای چهار لایه اجزاء بدن و مخزن خون به صورت معادلات (1) تا (5) است:

لایه هسته ($j=1$):

$$C(i, 1) \frac{dT(i, 1)}{dt} = Q(i, 1) - B(i, 1) - D(i, 1) - RES(i, 1) \quad (1)$$

لایه ماهیچه ($j=2$):

$$C(i, 2) \frac{dT(i, 2)}{dt} = Q(i, 2) - B(i, 2) + D(i, 1) - D(i, 2) \quad (2)$$

لایه چربی ($j=3$):

$$C(i, 3) \frac{dT(i, 3)}{dt} = Q(i, 3) - B(i, 3) + D(i, 2) - D(i, 3) \quad (3)$$

لایه پوست ($j=4$):

$$C(i, 4) \frac{dT(i, 4)}{dt} = Q(i, 4) - B(i, 4) + D(i, 3) - Q_e(i, 4) - E(i, 4) \quad (4)$$

مخزن خون یا گره 65م:

$$C(65) \frac{dT(65)}{dt} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 B(i, j) \quad (5)$$

که C ظرفیت گرمایی ویژه ($Wh/^{\circ}C$)، Q نرخ تولید حرارت، B تبادل حرارت هر گره با مخزن خون، D تبادل حرارت در اثر هدایت، $Q_e(i, j)$ تبادل حرارت محسوس از پوست، E اتلاف حرارت تبخیری از پوست و RES اتلاف حرارت در اثر تنفس می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در مدل تانابه [11] معادله‌های موازنه انرژی برای 16 جزء بدن به صورت جداگانه نوشته شده و اجزاء بدن از طریق انتقال حرارت هدایت با همدیگر و با مخزن خون در تماس هستند. در نتیجه در مدل ترکیبی LOTS، با استفاده از معادلات (1) تا (5)، دمای پوست، هسته و فرایندهای فیزیولوژیکی اجزاء مختلف بدن منظور شده و محاسبه می‌شود. ضمن این که امکان ارزیابی تاثیر غیرکنواختی شرایط محیطی و فردی بر پارامترهای ذکر شده وجود دارد [11].

2-2- تعیین احساس حرارتی موضعی و کلی با مدل دانشگاه برکلی

مدل دانشگاه برکلی توسط ژانگ و همکاران [17] در دانشگاه برکلی توسعه یافته است و یک مدل ارزیابی احساس و آسایش حرارتی موضعی و کلی بدن است. در این مدل، یک رابطه برای احساس حرارتی موضعی در 19 جزء مختلف بدن ارائه شده است که تابعی از دمای پوست موضعی، دمای پوست میانگین، دمای هسته متوسط و مشتقات آن‌ها نسبت به زمان است. دمای پوست موضعی و دمای میانگین پوست بیانگر پاسخ به حالت پایا و مشتقات آن‌ها بیانگر پاسخ به شرایط ناپایا می‌باشد. در قسمت استاتیکی، دمای پوست موضعی نشان دهنده احساس حرارتی موضعی و دمای میانگین پوست بیانگر احساس حرارتی کل بدن است [17]:

$$LTS_i = 4 \left(\frac{2}{1 + e^{-C1(T_{sk,i} - T_{sk,i, set}) - K1[(T_{sk,i} - T_{sk,i, set}) - (\bar{T}_{sk} - \bar{T}_{sk, set})]}} \right) - 1 + C_{2i} \frac{dT_{sk,i}}{dt} + C_{3i} \frac{dT_{cr}}{dt} \quad (6)$$

که اندیس i بیانگر اجزاء بدن، LTS_i احساس حرارتی موضعی جزء موردنظر،

کلی بدن براساس تحلیل رگرسیون نتایج تجربی می‌باشد. در نهایت، در مدل دانشگاه برکلیک شاخص برای احساس حرارتی کلی ارائه شده است که تاثیر احساس حرارتی موضعی اجزاء مختلف بدن بر احساس حرارتی کلی را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالب ذکر شده، تعداد محدودی مدل آسایش حرارتی برای پیش‌بینی آسایش حرارتی موضعی در محیط‌های غیرکنواخت وجود دارند. این مدل‌ها صرفاً تجربی بوده و برای محیط خاصی توسعه پیدا کرده‌اند. در حال حاضر، آسایش حرارتی موضعی با استفاده از دو روش معروف ارزیابی می‌گردد [18]: روش دمای معادل و مدل آسایش حرارتی دانشگاه برکلی. روش دمای معادل، اگرچه محدوده‌های دمایی قابل قبول به لحاظ آسایش حرارتی را برای اجزاء مختلف بدن در شرایط غیرکنواخت ارائه می‌دهد، اما یک مدل تجربی بوده و استفاده از آن محدود به شرایط خاصی است که نتایج در آن شرایط به دست آمده است و در ضمن اثرات رطوبت در آن لحاظ نشده است، از سوی دیگر مدل دانشگاه برکلی یک مدل مستقل نیست و باید با یک مدل تنظیم دمایی و ترموفیزیولوژیکی بدن انسان ترکیب شود و یا از طریق داده‌های آزمایشگاهی تغذیه شود. بنابراین می‌توان گفت که تاکنون مدل آسایش حرارتی که به تنهایی توانایی ارزیابی احساس حرارتی موضعی و سپس برآورد احساس حرارتی کلی را در محیط‌های غیرکنواخت داشته باشد، ارائه نشده است. بنابراین هدف از این مقاله، ارائه یک مدل ترکیبی جدید برای بررسی احساس حرارتی در محیط‌های غیرکنواخت می‌باشد. به این ترتیب که در ابتدا برای برآورد شرایط موضعی بدن از جمله دما و فرایندهای فیزیولوژیکی که لازمه پیش‌بینی احساس حرارتی موضعی است، از یک مدل فیزیولوژیکی چند بخشی استفاده شده است که برای این منظور، مدل 65 گرهی تانابه [11] انتخاب شده است. پس از ارزیابی دما و فرایندهای فیزیولوژیکی، با استفاده از مدل دانشگاه برکلی [17] احساس حرارتی موضعی 16 جزء بدن و احساس حرارتی کل بدن به دست می‌آید. مدل پیشنهادی جدید به دلیل این که مدلی برای پیش‌بینی احساس حرارتی موضعی و کلی است، $LOTS^1$ نامگذاری می‌شود.

2- مدل ترکیب پیشنهادی: مدل LOTS

با توجه به مطالب پیشین، برای پیش‌بینی احساس حرارتی افراد در محیط غیرکنواخت، بررسی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن ضروری می‌باشد. از طرف دیگر، برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی باید دما، انتقال حرارت و فرایندهای فیزیولوژیکی برای بخش‌های مختلف بدن به صورت جداگانه محاسبه شود. بنابراین باید از یک مدل فیزیولوژیکی چند بخشی استفاده نمود که توانایی ارزیابی اثرات غیرکنواختی محیط بر دما و سایر پارامترها را داشته باشد. برای این منظور در مدل پیشنهادی جدید، از مدل 65 نقطه‌ای تانابه [11] استفاده شده است. اما مدل تانابه [11] تنها دما و فرایندهای فیزیولوژیکی را پیش‌بینی می‌کند و رابطه‌ای برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی ارائه نمی‌کند. بنابراین در مدل پیشنهاد شده در تحقیق حاضر، $LOTS$ ، پس از به دست آوردن دما و اطلاعات فیزیولوژیکی برای 16 بخش بدن، از روابط پیشنهاد شده برای احساس حرارتی موضعی و کلی در مدل دانشگاه برکلی [17] استفاده شده است. در ادامه بخش‌های مدل پیشنهادی جدید که شامل ارزیابی شرایط موضعی بدن و ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی می‌باشد، بیشتر توضیح داده می‌شود.

¹ Local and Overall Thermal Sensation Model

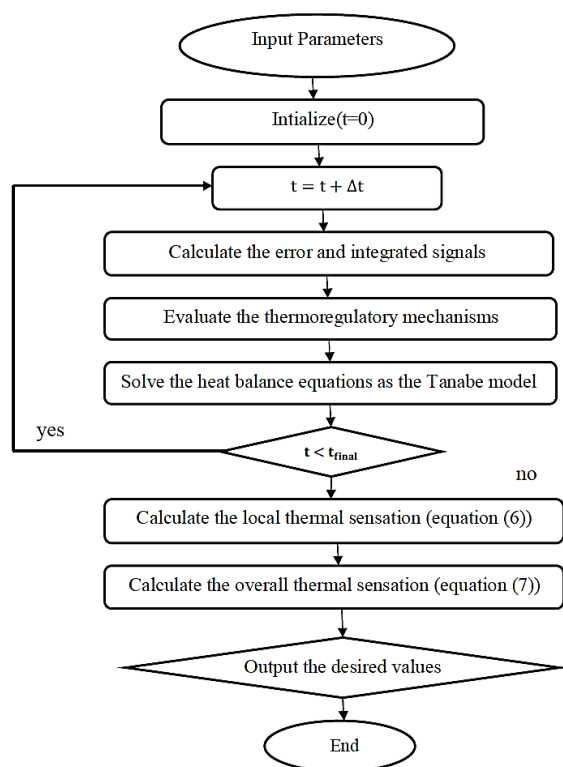


Fig.1 Flowchart of the new model

شکل 1 فلوچارت مدل جدید

علاوه بر نتایج تجربی استولویک و هاردی [19]، دمای متوسط پوست به دست آمده با نتایج مدل هویزنگا و همکاران [21] و نتایج کایناکلی و کلیک [22] مقایسه گردیده است که نتیجه این اعتبارسنجی در "شکل 2" نشان داده شده است. با توجه به "شکل 2"، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی استولویک و هاردی [19] و دو مدل تحلیلی هویزنگا و همکاران [21] و نتایج کایناکلی و کلیک [22] دارد. در مورد دوم، افراد با پوشش بسیار اندک و در حالت نشسته پنج فاز شرایط آب و هوایی را مطابق با آزمایش‌های منیر و همکاران [20]، که شامل شرایط آب و هوایی خنثی، سرد، خنثی، گرم و خنثی می‌باشد، تجربه می‌کنند. در "شکل 3"، متوسط دمای پوست به دست آمده از مدل جدید

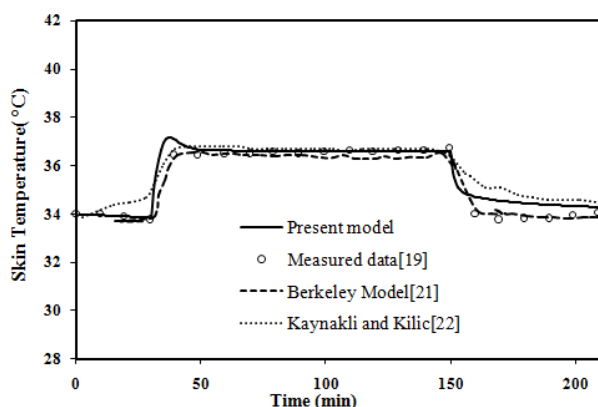


Fig.2 Comparison of predicted mean skin temperature with experimental data [19] and simulated data [21,22]

شکل 2 مقایسه متوسط دمای پوست به دست آمده از مدل پیشنهادی با نتایج تجربی [19] و نتایج مدل سازی [22,21]

به ترتیب دمای پوست موضعی و دمای پوست خنثی برای جزء موردنظر، $T_{skin,i}$ و $T_{skin,i, set}$ به ترتیب دمای پوست متوسط برای کل بدن، $\bar{T}_{skin, set}$ و دمای خنثی برای پوست کل بدن، T_{cr} دمای هسته متوسط کل بدن، C_{2i} و C_{3i} به ترتیب ضرایب تحلیل رگرسیون برای دمای پوست و هسته می‌باشند که برای گرمایش و سرمایش عضو موردنظر ضرایب متفاوتی ارائه شده است. لازم به ذکر است که در مدل UCB دمای پوست خنثی برای بخش‌های مختلف بدن از طریق آزمایش روی افراد مختلف تحت شرایط خنثی به دست آمده است. بعد از به دست آوردن شاخص احساس حرارتی موضعی (LTS_i) ، باید رابطه‌ای میان احساس حرارتی موضعی اعضا و احساس حرارتی کلی بدن پیدا نمود. در مدل دانشگاه برکلی با استفاده از تحلیل رگرسیون یک سری فاکتور وزنی برای 19 جزء بدن تعریف شده است که به کمک آن‌ها احساس حرارتی کل بدن به احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن مرتبط شده است:

$$OTS = \frac{\sum_i weight_i LTS_i}{\sum_i weight_i} \quad (7)$$

که OTS احساس حرارتی کل بدن می‌باشد و فاکتور وزنی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$weight_i = a \times (LTS_i - \bar{LTS}_i) \quad (8)$$

که a ضریب تحلیل رگرسیون برای مدل خطی و $\bar{LTS}_i$ میانگین احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن است [17]. با استفاده از رابطه (7) می‌توان تاثیر احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن را بر احساس حرارتی کلی ارزیابی نموده و در نتیجه اعضایی که در یک محیط حرارتی بیشترین و یا کمترین اثر را بر احساس حرارتی اعمال می‌کنند، تعیین نمود.

2-3- فلوچارت عملکرد مدل جدید LOTS

فلوچارت مدل ترکیبی جدید، به صورت شماتیک در "شکل 1" نشان داده شده است که به ترتیب نحوه ارزیابی دما، فرایندهای فیزیولوژیکی، احساس حرارتی موضعی و احساس حرارتی کل بدن را نشان می‌دهد.

3- ارزیابی دقت عملکرد مدل جدید LOTS

برای بررسی عملکرد مدل ترکیبی جدید، نتایج به دست آمده برای دمای پوست متوسط، دمای پوست موضعی، احساس حرارتی موضعی و احساس حرارتی کلی در چهار مورد مختلف با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده است. لازم به ذکر است که دمای متوسط پوست از طریق میانگین‌گیری براساس سطح 16 بخش بدن و پس از محاسبه دمای پوست موضعی 16 بخش بدن و طبق رابطه (9) به دست آمده است:

$$\bar{T}_{skin} = \frac{\sum_{i=1}^{16} A_{Du}(i) T_{skin}(i)}{\sum_{i=1}^{16} A_{Du}(i)} \quad (9)$$

که $\bar{T}_{skin}$ دمای متوسط پوست برای کل بدن، $T_{skin}(i)$ دمای پوست موضعی و $A_{Du}(i)$ سطح بخش نام می‌باشد. مقادیر مربوط به $A_{Du}(i)$ در مدل تانابه برای 16 بخش بدن مشخص شده است.

در ابتدا در دو مورد مختلف، دمای متوسط پوست به دست آمده از مدل پیشنهادی، با داده‌های آزمایشگاهی استولویک و هاردی [19] و عبدالمنیر و همکاران [20] مقایسه گردیده است. در مورد اول، افراد با پوشش حدود 0.1clo و در حالت نشسته ابتدا به مدت 30 دقیقه در معرض محیطی با دمای 30°C و رطوبت نسبی 40% قرار گرفتند و سپس به مدت 2 ساعت، محیطی با دمای 48°C و رطوبت نسبی 30% را تجربه کردند و پس از آن دوباره به محیط اولیه بازگردانده شده و به مدت 1 ساعت در آن اقامت کردند.

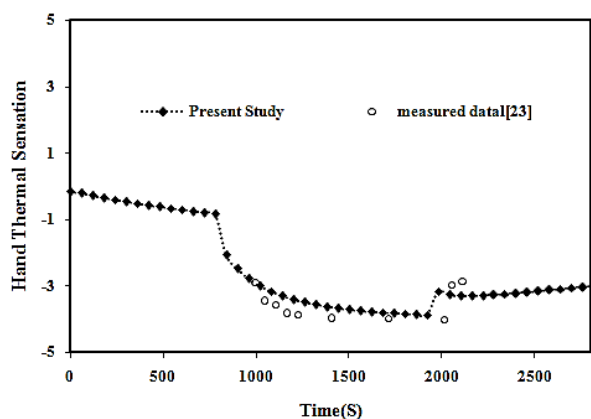


Fig. 5 Comparison of the simulated left hand thermal sensation and measured data (Zhang et al.[23])

شکل 5 مقایسه احساس حرارتی موضعی دست چپ به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی مدل ژانگ و همکارانش [23]

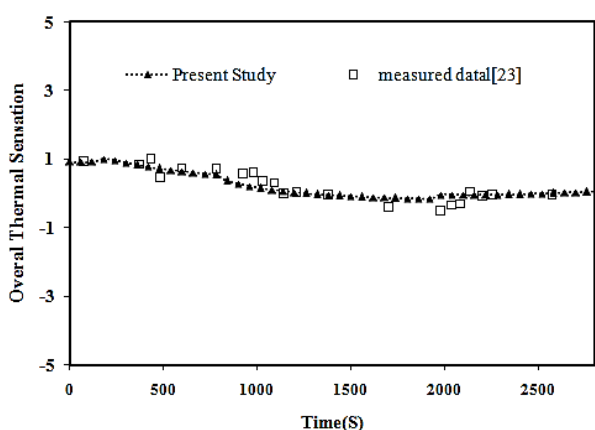


Fig. 6 Comparison of the simulated overall thermal sensation and measured data (Zhang et al [23])

شکل 6 مقایسه احساس حرارتی کل به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی مدل ژانگ و همکارانش [23]

مدل جدید در پیش‌بینی دمای موضعی پوست نیز همانند دمای میانگین پوست دارای عملکرد نسبتاً خوبی است.

برای مورد چهارم اعتبارسنجی، آزمایش‌های انجام شده توسط چانگ و همکاران [24] مدنظر قرار گرفته است. در این آزمایش‌ها افراد به مدت سه ساعت در یک محیط اداری و با فعالیت معمول اداری قرار گرفتند به طوری که محیط ذکر شده دارای یک سیستم تهویه با جریان جابجایی بوده که گرادیان دمایی عمودی بر محیط اعمال می‌کند و در نتیجه افراد یک محیط غیریکنواخت را تجربه می‌کنند. برای صحت‌سنجی، پنج مورد از این آزمایش‌ها انتخاب شده‌اند که شرایط فردی و محیطی این پنج مورد در جدول 1 آورده شده است. در شرایط محیطی ذکر شده احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن و در نهایت احساس حرارتی کل بدن افراد ارزیابی شده است که مقایسه نتایج به دست آمده از مدل جدید با داده‌های تجربی در "شکل 7" نشان داده شده است.

ماکزیم و متوسط خطای مشاهده شده برای ارزیابی احساس حرارتی کل بدن در مقایسه با نتایج تجربی، به ترتیب 0.59 و 0.38 واحد و مقادیر متناظر برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن، 0.6 و

LOTS با داده‌های آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شده‌اند که نشان دهنده تطابق بسیار خوب با نتایج تجربی می‌باشد.

به‌عنوان مورد سوم برای صحت‌سنجی، دمای پوست و احساس حرارتی موضعی دست چپ و نیز احساس حرارتی کل بدن به دست آمده از مدل جدید، با داده‌های آزمایشگاهی ژانگ و همکارانش [23]، مقایسه شده است. در این آزمایش‌ها، افراد با پوشش نسبتاً کم ابتدا به مدت 15 دقیقه، در یک محیط با دمای هوای 28°C اقامت کرده، سپس سرمایه‌های موضعی روی دست چپ آن‌ها با دمای 14°C به مدت 19 دقیقه اعمال می‌شود. برای شرایط ذکر شده، دمای دست، احساس حرارتی موضعی دست و احساس حرارتی کل بدن به دست آمده از مدل جدید، به ترتیب در "شکل‌های 4، 5 و 6" با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در "شکل‌های 4، 5 و 6" نشان داده شده است، برای حالت سرمایه‌های موضعی نتایج به دست آمده از مدل حاضر برای دما، احساس حرارتی موضعی دست و احساس حرارتی کل بدن، سازگاری بسیار خوبی با نتایج تجربی مربوطه از خود نشان داده است. به‌طوری که برای شرایط محیطی و فردی ذکر شده، ماکزیم خطای مشاهده شده برای دمای پوست موضعی کمتر از 1°C و برای احساس موضعی و کلی کمتر 0.5 واحد می‌باشد. بنابراین

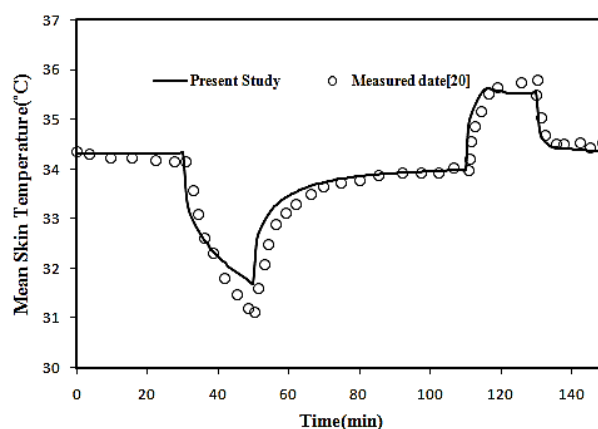


Fig. 3 Comparison of calculated mean skin temperature with experimental data of Munir et al [20]

شکل 3 مقایسه متوسط دمای پوست به دست آمده از مدل حاضر با نتایج تجربی منیر و همکاران [20]

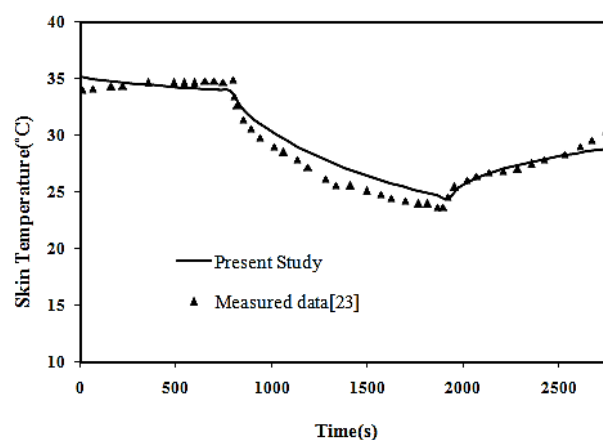


Fig. 4 Comparison of the simulated left hand skin temperature and measured data (Zhang et al [23])

شکل 4 مقایسه دمای پوست دست به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی مدل ژانگ و همکارانش [23]

- احساس حرارتی کلی با دقت کمتر از 0.5 واحد ارزیابی شده است.

3-4- احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن و احساس حرارتی کلی

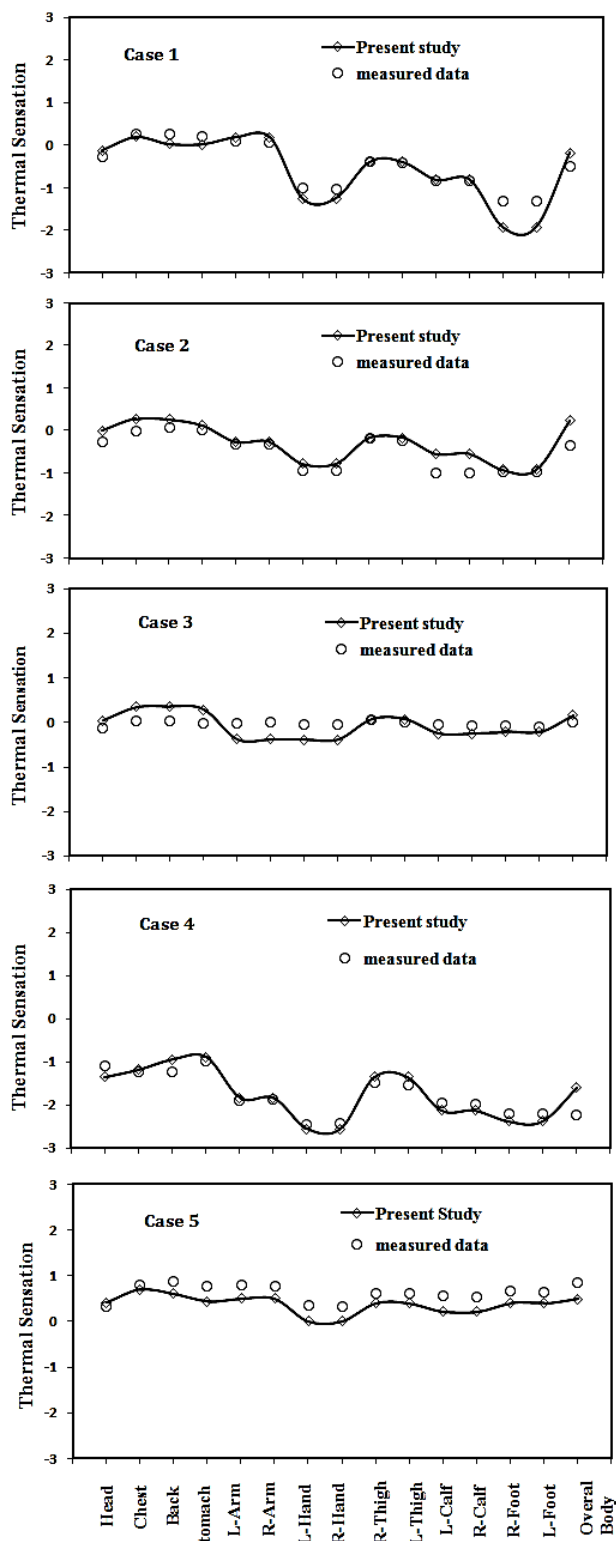


Fig. 7 Comparison of calculated local and overall thermal sensation with experimental data of Cheong et al [24]

شکل 7 مقایسه احساس حرارتی موضعی و کلی بدست آمده از مدل جدید بانثایج تجربی چانگ و همکاران [24]

جدول 1 شرایط محیطی و فردی مطابق با آزمایش‌های چانگ و همکاران [24]
Table 1 environmental and personal conditions of Cheong et al [24] experiments

مورد	عایق لباس clo	سرعت هوا (m/s)	رطوبت نسبی	دمای هوا (°C) در ارتفاع 0.6m
اول	1.15	0.1	50	20
دوم	0.91	0.1	50	23
سوم	0.64	0.02	50	26
چهارم	0.73	0.05	50	20
پنجم	0.82	0.03	50	26

0.22 بوده واحد است. خطاهای ایجاد شده می‌تواند به دلیل عدم تعریف واضح بعضی از پارامترهای محیطی یا فردی مثل نحوه توزیع لباس بین بخش‌های مختلف بدن در داده‌های تجربی باشد.

به عنوان مثال در آزمایش‌های انجام شده توسط چانگ و همکاران [24]، میزان عایق لباس برای کل بدن ذکر شده اما در مورد میزان پوشش قسمت‌های مختلف بدن اطلاعاتی داده نشده که این موضوع می‌تواند بر دمای موضعی اجزاء بدن و نتیجتاً بر احساس موضعی و کلی تأثیرگذار باشد. لذا تفاوت نتایج به دست آمده می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط باشد و نه خطای مدل LOTS. بنابراین با توجه به مطالبی که ذکر شد، می‌توان از مدل جدید با اطمینان کافی برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن و احساس حرارتی کل بدن در یک محیط غیریکنواخت و ناپایا استفاده نمود.

4- خلاصه و جمع‌بندی

مدل‌های آسایش حرارتی متداول، برای محیط‌های یکنواخت و یا پایا توسعه یافته‌اند و احساس حرارتی کلی بدن را پیش‌بینی می‌کنند. این مدل‌ها ممکن است برای محیط‌های یکنواخت جواب‌های قابل قبولی ارائه دهند، اما محیط‌های حرارتی اغلب غیریکنواخت و ناپایا هستند و ارزیابی آسایش حرارتی در چنین محیط‌هایی معمولاً کار پیچیده‌ای است و تحقیقات نشان داده است که واکنش مردم به محیط نامتقارن بستگی به احساس حرارتی قسمت‌های موضعی بدن آن‌ها دارد نه به احساس حرارتی کل بدن آن‌ها [17]. در حال حاضر، آسایش حرارتی موضعی به وسیله مدل دمای همگن معادل بررسی می‌شود که این دما، محدوده آسایش را برای شرایط خاصی تعیین می‌کند. بنابراین قایل تعمیم به همه محیط‌ها و اشخاص مختلف با شرایط متفاوت نیست [18]. در تحقیق حاضر، مدل ترکیبی جدید LOTS، برای بررسی احساس حرارتی موضعی و کلی در محیط‌های غیریکنواخت پیشنهاد شده است. نتایج بدست آمده از مدل جدید انطباق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی و نظری گزارش شده در تحقیقات [19-24] دارد. اهم نتایج به دست آمده از مدل LOTS عبارت است از:

1-4- دمای متوسط پوست

متوسط دمای پوست با دقت قابل قبول محاسبه شده به طوری که خطای آن کمتر از 0.5 درجه سلسیوس بوده است.

2-4- حالت سرمایش و یا گرمایش موضعی

- دمای موضعی پوست با دقت کمتر از 1 درجه سلسیوس به دست آمده است.

- احساس حرارتی موضعی با دقت کمتر از 0.5 واحد ارزیابی شده است.

- Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 4, pp. 371-384, 2007.
- [11] S. 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.
- [12] D. P. Wyon, S. Larsson, B. Forsgren, I. Lundgren, Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin, *SAE Technical Paper Series*, Vol. 890049, pp. 1-11, 1989.
- [13] K. Matsunaga, F. Sudo, S. Tanabe, T. Madsen, Evaluation and measurement of thermal comfort in the vehicles with a new thermal manikin, *SAE Paper Series*, Vol. 931958, pp. 1-11, 1993.
- [14] I. Kohri, T. Moschida, Evaluation method of thermal comfort in a vehicle with a dispersed two-node model: Part 1-development of dispersed two-node model, *Journal of Human-Environmental System*, Vol. 6, No. 1, pp. 19-29, 2002.
- [15] B. W. Jones, Y. Ogawa, Transient Interaction between the Human and the Thermal Environment, *ASHRAE Transaction*, Vol. 98, No. 1, pp. 189-195, 1992.
- [16] M. Hagino, H. Junichiro, Development of a method for predicting comfortable airflow in the passenger compartment, *SAE Technical Paper Series*, Vol. 922131, pp. 1-12, 1992.
- [17] H. Zhang, *Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments*, Phd Thesis, University of California, Berkeley, 2003.
- [18] E. Foda, *Evaluating Local and Overall Thermal Comfort in Buildings Using Thermal Manikins*, Phd Thesis, Aalto University, 2012.
- [19] J. A. J. Stolwijk, J. Hardy, Temperature regulation in man: A theoretical study, *European Journal of Physiology*, Vol. 291, No. 2, pp. 129-162, 1966.
- [20] 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. 2, pp. 1777-1787, 2009.
- [21] C. Huizenga, H. Zhang, E. Arens, A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments, *Building and Environment*, Vol. 36, No. 6, pp. 691-699, 2001.
- [22] O. Kaynakli, M. Kilic, Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions, *Building and Environment*, Vol. 40, No. 2, pp. 165-174, 2005.
- [23] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part III: whole-body sensation and comfort, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 399-410, 2009.
- [24] K. W. Cheong, W. J. Yu, S. C. Sekhar, K. W. Tham, R. Kosonen, Local thermal sensation and comfort study in a field environment chamber served by displacement ventilation system in the tropics, *Building and Environment*, Vol. 42, No. 12, pp. 525-533, 2007.

ماکزیمم و متوسط خطا برای پیش بینی احساس حرارتی موضعی بخش‌های مختلف بدن در شرایط فردی و محیطی مختلف به ترتیب 0.22 و 0.6 واحد و مقادیر متناظر برای احساس حرارتی کلی به ترتیب 0.38 و 0.59 واحد بوده است.

با توجه به سادگی محاسبات و در نظر گرفتن شرایط غیریکنواخت و ناپایا در مدل جدید، کاربرد آن برای ارزیابی احساس حرارتی موضعی و کلی بدن توصیه می‌شود.

5- مراجع

- [1] P. O. Fanger, *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, pp. 28-30, 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] 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.
- [4] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new simplified thermoregulatory bioheat model for evaluating thermal response of the human body to transient environments, *Building and Environment*, Vol. 45, No. 10, pp. 2068-2076, 2010.
- [5] H. H. Pennes, Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm, *Applied Physiology*, Vol. 1, No. 2, pp. 93-122, 1948.
- [6] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A new predictive index for evaluating both thermal sensation and thermal response of the human body, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 4, pp. 855-862, 2011.
- [7] ANSI/ASHRAE Standard 55, *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*, 2004.
- [8] J. A. J. Stolwijk, A mathematical model of physiological temperature regulation in man, NASA Contractor Report, DC: *National Aeronautics and Space Administration*, NASA CR-1855, Washington, 1971.
- [9] D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohr, Computer predictions of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environment conditions, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 45, No. 3, pp. 143-159, 2001.
- [10] M. Salloum, N. Ghaddar, K. Ghali, A new transient bioheat model of the human body and its interaction to clothing models, *International Journal of*