

## Thermal Response Modeling of Human Body under the Influence of Eating Cold or Hot Food

A.R. Zolfaghari<sup>1</sup>, M. Maerefat<sup>2\*</sup>, A. Omidvar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Postdoctoral Researcher, Energy Conversion Group, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, alireza.zolfaghari@yahoo.com

<sup>2</sup> Associate Professor, Energy Conversion Group, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Energy Conversion Group, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, omidvar@sutech.ac.ir

### Abstract

Generally, most of the human thermal response models are dependent upon a narrow range of personal/environmental parameters. In other words, the effects of other parameters such as eating foods are not considered in these models. On the other hand, previous studies have indicated that the overall thermal condition of the body can be significantly affected by eating cold or hot foods. In the present study, the time-dependent thermal response of the human body is simulated with considering the effect of eating hot/cold food. This simulation is performed by adding an extra term to Gagge's transient model. In this study, three thermal conditions of the human body (hot, neutral and cold) are considered and the effects of eating hot/cold food are investigated under the mentioned conditions. Results indicate that the effects of eating hot or cold food are not negligible during the eating time and also in a period of time after that. At the neutral condition, the human thermal sensation is more sensitive to hot food than to cold ones. Eating hot food changes the body thermal sensation from neutral to hot. But, eating cold food would not make significant changes in the thermal sensation of the body. Results also show that cold food changes the body core temperature more than hot food. While hot food influences the skin temperature significantly.

**Key words:** Thermal response, Human body, Hot/Cold food, Thermal comfort, Gagge's model.

\*Corresponding author

**Address:** Mehdi Maerefat, Energy Conversion Group, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Jalal Al-Ahmad St., Nasr Bridge, Tehran, Iran  
**Tel:** +98 21 82883360  
**Fax:** +98 21 82883381  
**E-mail:** maerefat@modares.ac.ir

## مدلسازی و تحلیل پاسخ حرارتی بدن تحت تأثیر صرف غذای سرد یا گرم

سیدعلیرضا ذوالفقاری<sup>۱</sup>، مهدی معرفت<sup>۲\*</sup>، امیر امیدوار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشگر دوره فوق دکترا، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
alireza.zolfaghari@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی شیراز.omidvar@sutech.ac.ir

### چکیده

در اغلب مدل‌های پاسخ حرارتی بدن، مدلسازی بر اساس پارامترهای فردی و محیطی انجام می‌گیرد و تأثیر برخی از پارامترهای فرعی نظیر صرف غذا در این مدلسازی‌ها لحاظ نمی‌شود. این در حالیست که نتایج برخی تحقیقات نشان می‌دهد که صرف غذاهای سرد و گرم اثر قابل ملاحظه‌ای بر شرایط حرارتی بدن دارد. در این تحقیق پاسخ حرارتی بدن در شرایط گذرا تحت تأثیر صرف غذاهای سرد و گرم مدلسازی شده است. بدین منظور با افزودن ترمی به مدل ناپایای گایج سعی شده است تا پاسخ حرارتی بدن در مقابل صرف غذای سرد یا گرم در شرایط مختلف محیطی مورد بررسی قرار گیرد. این بررسی‌ها برای سه حالت حرارتی مختلف بدن (گرم، خنثی و سرد) در شرایط گوناگون صرف غذا انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه زمانی صرف غذا و حتی مدتی پس از آن، از اثرات غذای صرف شده بر شرایط حرارتی بدن نمی‌توان صرف نظر نمود. به طوری که احساس افراد در شرایط حرارتی خنثی نسبت به صرف غذاهای گرم بیشتر از غذاهای سرد متأثر می‌شود. صرف غذاهای گرم می‌تواند احساس حرارتی افراد را از حالت خنثی به حالت احساس گرما تغییر دهد. در حالی که صرف غذاهای سرد نمی‌تواند تغییر چشمگیری بر احساس حرارتی افراد و خروج آن از منطقه خنثی داشته باشد. همچنین معلوم شد که صرف غذای سرد دمای مرکز بدن را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی که صرف غذای گرم بر دمای پوست اثر بیشتری دارد.

کلیدواژگان: پاسخ حرارتی، بدن انسان، غذای سرد/گرم، آسایش حرارتی، مدل گایج.

\*عهددار مکاتبات

نشانی: تهران، جلال آل احمد، پل نصر، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک  
تلفن: ۸۲۸۸۳۳۶۰، دورنگار: ۸۲۸۸۳۳۸۱، پیام نگار: maerfat@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

مدلسازی پاسخ حرارتی بدن در مقابل تغییر عوامل محیطی؛ به دلیل کاربردهایی که در زمینه معماری، طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش، صنایع هوافضا، علوم پزشکی و ... دارد؛ موضوعیست که سال‌ها مورد توجه محققان بوده است. در چند دهه اخیر، مدل‌های بسیاری در زمینه مدلسازی تحلیلی پاسخ حرارتی بدن ارائه شده‌اند که هر یک از آنها قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی دارند [۱]. اما در این میان مدل پایای فنگر<sup>۱</sup> [۲] و مدل ناپایای گایج<sup>۲</sup> [۳] محبوبیت بیشتری پیدا کردند و به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفتند، تا حدی که مدل‌های مذکور به‌عنوان مدل‌های پایه در استانداردهای آسایش حرارتی معرفی شدند [۴].

معمولاً مدلسازی حرارتی بدن بر اساس پارامترهای فردی (مانند نوع پوشش، نرخ متابولیک و نرخ کار) و محیطی (مانند دمای هوا، دمای میانگین تابش، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا) صورت می‌گیرد و عوامل جانبی از جمله تأثیر صرف غذا در این مدلسازی‌ها لحاظ نمی‌شود. این در حالیست که نتایج برخی تحقیقات حاکی از آن است که صرف غذاهای سرد و گرم می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر شرایط حرارتی بدن داشته باشد [۵]. در مدل ارائه شده به وسیلهٔ هاوپ<sup>۳</sup> اثر صرف غذاهای سرد و گرم در مدلسازی پایای بدن لحاظ شده و از این طریق مدل معروف فنگر بهبود یافته است [۵]. اما تاکنون تأثیر صرف غذاهای سرد و گرم در مدل‌های ناپایای حرارتی بدن لحاظ نشده است. این موضوع در مکان‌های صرف غذا و نوشیدنی مانند رستوران‌ها بسیار حائز اهمیت است. از آنجا که مدت زمان حضور افراد در چنین مکان‌هایی نسبتاً کوتاه است، دسترسی به شرایط حرارتی پایا برای افراد امکان‌پذیر نیست. در چنین شرایطی بررسی تأثیر صرف غذای گرم یا سرد بر شرایط ناپایای حرارتی بدن از اهمیت بسزایی برخوردار است.

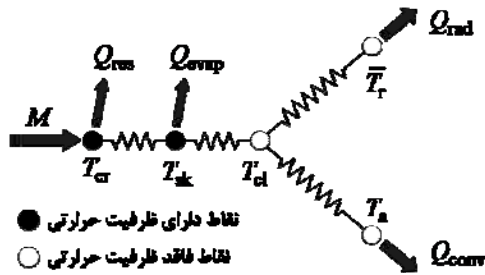
در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی در زمینه مدلسازی پاسخ حرارتی بدن و آسایش حرارتی به وسیلهٔ محققان در دانشگاه تربیت مدرس آغاز شده است که نتیجهٔ این تحقیقات موجب توسعهٔ کد کامپیوتری EBSim<sup>۴</sup> در زمینهٔ

مدلسازی پاسخ حرارتی بدن و شرایط آسایش حرارتی در داخل ساختمان گردید [۶-۹]. کد کامپیوتری مذکور قادر است با در نظر گرفتن شرایط پیچیدهٔ حرارتی محیط، پاسخ حرارتی بدن را پیش‌بینی کرده و محیطی قابل قبول، از نظر حرارتی طراحی نماید. همچنین کد EBSim این قابلیت را داراست که در شرایط پایا و ناپایا پاسخ حرارتی بدن را طبق استانداردهای معمول آسایش حرارتی، مدلسازی و پیش‌بینی کند. کد EBSim بارها در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته و صحت نتایج آن به تأیید رسیده است. در این مقاله با افزودن ترمی به مدل ناپایای گایج به منظور مدلسازی تأثیر صرف غذای سرد یا گرم، سعی شده است تا پاسخ حرارتی بدن در مقابل صرف غذای سرد یا گرم در شرایط مختلف محیطی مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- مدلسازی پاسخ حرارتی بدن

مدل‌های بسیار متنوعی برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن ارائه شده‌اند که غالباً بر پایهٔ معادلهٔ موازنهٔ انرژی<sup>۵</sup> برای بدن استوارند. این مدل‌ها را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم کرد. دستهٔ اول مدل‌هایی هستند که پاسخ حرارتی بدن را در شرایط پایا مدلسازی می‌کنند. در این میان می‌توان به مدل فنگر به عنوان معروف‌ترین مدل پایا برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن اشاره کرد [۲]. فنگر در مدل خود شاخصی به نام PMV<sup>۶</sup> را برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن معرفی می‌کند و از طریق آن، احساس حرارتی افراد نسبت به محیط را پیش‌بینی می‌نماید. دستهٔ دوم مدل‌هایی هستند که به مدلسازی پاسخ حرارتی بدن در شرایط ناپایا می‌پردازند. مدل‌های گایج [۳]، ایمری<sup>۷</sup> [۱۰] و استولویجک<sup>۸</sup> [۱۱] از جمله مدل‌های موفق و پرکاربرد در این زمینه محسوب می‌شوند. از این میان مدل گایج محبوبیت بیشتری پیدا کرده است و به عنوان معمول‌ترین و پرکاربردترین مدل ناپایا برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مدل دو لایه‌ای گایج، بدن به صورت دو استوانهٔ هم مرکز مدل می‌شود که استوانهٔ داخلی نمایندهٔ مرکز بدن (اسکلت، ماهیچه‌ها و اعضای داخلی) بوده و استوانهٔ خارجی نشانگر

<sup>۱</sup> Fanger<sup>۵</sup> Energy Balance Equation<sup>۲</sup> Gagge<sup>۶</sup> Predicted Mean Votes<sup>۳</sup> Höpfe<sup>۷</sup> Imre<sup>۴</sup> Energy and Building Simulator<sup>۸</sup> Stolwijk



شکل ۱- مدل دو لایه‌ای گایج و سازوکارهای انتقال حرارت حاکم بر آن

گایج برای پیش‌بینی شرایط آسایش حرارتی پارامتر احساس حرارتی<sup>۹</sup> (TSENS) را تعریف می‌کند. شاخص TSENS بیانگر احساس حرارتی افراد است و با عددی بین ۵- و ۵+ نشان داده می‌شود. به طوری که هر عدد صحیح، معادل یک احساس حرارتی به این شرح است: ۵+ گرمای غیر قابل تحمل، ۴+ خیلی داغ، ۳+ داغ، ۲+ گرم، ۱+ کمی گرم، ۰ خنثی، ۱- کمی خنک، ۲- خنک، ۳- سرد، ۴- خیلی سرد، ۵- سرمای غیر قابل تحمل [۱۲]. شاخص TSENS در قالب معادله (۵) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & T_b < T_{b,c} \\ 4.7\eta_e(T_b - T_{b,c}) / (T_{b,h} - T_{b,c}) & T_{b,c} \leq T_b \leq T_{b,h} \\ 4.7\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) & T_b > T_{b,h} \end{cases} \quad (5)$$

که  $T_b$ ،  $T_{b,c}$ ،  $T_{b,h}$  و  $\eta_e$  پارامترهای مشخصه دمایی بدن هستند و هر یک توسط روابطی مجزا تعریف می‌شود [۱۴]. همان‌طور که پیش از این ذکر شد در مدل گایج، تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی افراد لحاظ نشده است؛ در حالی که هاوپ تأثیر صرف غذای سرد یا گرم را در مدل پایای فنگر وارد نموده است [۵]. به این ترتیب که هاوپ در معادله موازنه انرژی بدن، جمله جدیدی برای مدلسازی تأثیر خوردن غذا بر شرایط حرارتی بدن را لحاظ می‌کند. این جمله به وسیله رابطه (۶) محاسبه می‌شود [۵]:

$$F = m_F C_F (T_F - T_{cr}) / \theta \quad (6)$$

که  $F$  انتقال حرارت محسوس در اثر صرف غذا،  $m_F$  جرم غذای مصرفی ( $kg$ )،  $C_F$  ظرفیت گرمایی ویژه غذای مصرفی ( $J/kg.K$ )،  $T_F$  دمای متوسط غذا و  $\theta$  زمان تبادل حرارت است. در بسیاری از مواقع میزان تبادل حرارت به وسیله صرف غذا ناچیز و قابل صرف‌نظر است ولی در موارد

پوست است. شکل ۱ طرحواره‌ای از مدل دو لایه‌ای گایج و سازوکارهای انتقال حرارت حاکم بر آن را نشان می‌دهد. برای دو لایه مدل گایج (مرکز و پوست) می‌توان معادله موازنه انرژی بدن را به صورت مجزا نوشت [۱۲]:

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

$$S_{sk} = Q_{cr,sk} - (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) \quad (2)$$

که  $S_{cr}$  میزان ذخیره حرارت در بخش مرکزی،  $M$  نرخ متابولیک (حرارت تولید شده در بدن ناشی از فرایند سوخت‌وساز)،  $W$  نرخ کار انجام شده به وسیله شخص،  $Q_{res}$  اتلاف حرارت از طریق تنفس،  $Q_{cr,sk}$  میزان تبادل حرارت میان بخش مرکزی و پوست،  $S_{sk}$  میزان ذخیره حرارت در بخش پوست و  $C_{sk}$ ،  $R_{sk}$  و  $E_{sk}$  به ترتیب انتقال حرارت توسط جابه‌جایی، تابش و تبخیر از پوست است. از سوی دیگر، نرخ ذخیره حرارت در بدن باید با نرخ افزایش انرژی داخلی برابر باشد [۱۳]. پس:

$$S_{cr} = \frac{(1 - \alpha)mC_{p,b}}{A_D} \cdot \frac{dT_{cr}}{d\theta} \quad (3)$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha m C_{p,b}}{A_D} \cdot \frac{dT_{sk}}{d\theta} \quad (4)$$

که  $m$  جرم بدن،  $A_D$  سطح بدن،  $\alpha$  کسر تجمع جرمی در ناحیه پوست،  $T_{cr}$  دمای مرکز بدن،  $T_{sk}$  دمای پوست،  $C_{p,b}$  ظرفیت گرمایی بدن ( $3490 J/kg.K$ ) و  $\theta$  زمان است [۴].

در مدل گایج سعی شده است که تأثیر برخی فرایندهای تنظیم دمایی بر شرایط حرارتی بدن لحاظ شود. در این مدل برخی فرایندهای کنترل و تنظیم کننده دمای بدن، از جمله تعرق تنظیمی، لرز و اتساع و انقباض رگ‌ها مدلسازی شده است. این فرایندهای کنترلی، از طریق سیگنال‌های فرستاده شده توسط حسگرهای دمایی بدن عمل می‌کنند. قدرت این سیگنال‌ها به میزان اختلاف دمای پوست، مرکز و یا دمای کلی بدن با دماهای خنثی متناظر وابستگی دارد. در واقع دمای خنثی بیانگر حالتی است که بدن بدون نیاز به فرایندهای کنترلی و بدون تلاش فیزیولوژیکی، قادر باشد با محیط اطراف در تعادل حرارتی باقی بماند. بنابراین میزان انحراف دمای بدن نسبت به دمای خنثی، بیانگر نیاز بدن به فعال شدن فرایندهای فیزیولوژیکی تنظیم دمای بدن است.

<sup>9</sup> Thermal Sensation

استولویجک و هاردی<sup>۱۰</sup> [۱۵]، نتایج مدلسازی هویزنگا<sup>۱۱</sup> [۱۶] و کایناکلی<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۴] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که مدل حاضر با میانگین خطای حدود  $0.37^{\circ}\text{C}$  نسبت به نتایج آزمایشگاهی قادر به مدلسازی دمای پوست است. در حالی که خطای متوسط مدل هویزنگا در حدود  $0.21^{\circ}\text{C}$  است [۱۶] که البته باید توجه داشت که مدل هویزنگا یک مدل چند هزار نقطه‌ای و پیچیده است که انتظار می‌رود جواب‌های دقیق‌تری نسبت به مدل دو نقطه‌ای حاضر داشته باشد.

به عنوان دومین مورد برای اعتبارسنجی مدل و کد کامپیوتری EBSim شرایطی در نظر گرفته می‌شود که در آن، افراد پس از ۳۰ دقیقه حضور در محیطی با دمای  $28^{\circ}\text{C}$  به طور ناگهانی به محیطی با دمای  $4/7^{\circ}\text{C}$  وارد می‌شوند و به مدت ۲ ساعت در این محیط باقی می‌مانند. در این شرایط دمای پوست پیش‌بینی شده به وسیله مدل حاضر با نتایج تجربی گوردن<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۷] و نتایج مدلسازی فریرا<sup>۱۴</sup> و یانایهارا<sup>۱۵</sup> [۱۸] مقایسه و در شکل ۲-ب نشان داده شده است. در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود که مدل حاضر با میانگین خطای حدود  $0.18^{\circ}\text{C}$  نسبت به نتایج آزمایشگاهی قادر به مدلسازی دمای پوست است. در حالی که خطای متوسط مدل فریرا و یانایهارا در حدود  $0.35^{\circ}\text{C}$  است [۱۸] که این خطا می‌تواند ناشی از عدم مدلسازی برخی عوامل فیزیولوژیکی در مدل آنها باشد.

سومین مورد برای اعتبارسنجی مربوط به شرایطی است که افراد پس از ۲ ساعت حضور در محیطی با دمای  $37/5^{\circ}\text{C}$  ناگهان به محیطی با دمای  $28/5^{\circ}\text{C}$  منتقل می‌شوند. در شکل ۲-ج دمای پوست پیش‌بینی شده به وسیله مدل حاضر با نتایج تجربی استولویجک و هاردی [۱۹] و نتایج مدلسازی فریرا و یانایهارا [۱۸] مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که میانگین خطای مدل حاضر نسبت به نتایج آزمایشگاهی در حدود  $0.16^{\circ}\text{C}$  است. در حالی که خطای متوسط مدل فریرا و یانایهارا در حدود  $0.56^{\circ}\text{C}$  است [۱۸] که همان‌طور که گفته شد، می‌تواند ناشی از عدم مدلسازی برخی عوامل فیزیولوژیکی در مدل آنها باشد.

خاصی که غذای مصرف شده خیلی سرد یا گرم باشد، تبادل حرارت به وسیله صرف غذا قابل چشم‌پوشی نخواهد بود. به عنوان مثال خوردن  $100\text{g}$  بستنی به مدت ۱۰ دقیقه حدود  $83\text{W}$  اتلاف حرارت در پی خواهد داشت. همچنین صرف  $250\text{cc}$  سوپ داغ در مدت ۵ دقیقه، حدود  $80\text{W}$  حرارت به بدن خواهد افزود [۵].

همان‌طور که گفته شد در مدل ناپایای گایج، تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی افراد لحاظ نشده است. اما با افزودن رابطه (۶) به معادله موازنه انرژی بخش مرکزی بدن (رابطه ۱) می‌توان قابلیت مدلسازی تأثیر صرف غذای سرد یا گرم را به مدل گایج اضافه کرد. به این ترتیب معادلات موازنه انرژی بدن برای دو لایه مدل گایج (مرکز و پوست) به شکل روابط (۷) و (۸) در می‌آیند:

$$\frac{(1-\alpha)mC_{p,b}}{A_D} \cdot \frac{dT_{cr}}{d\theta} = M - W - Q_{res} - Q_{cr,sk} + F \quad (7)$$

$$\frac{\alpha m C_{p,b}}{A_D} \cdot \frac{dT_{sk}}{d\theta} = Q_{cr,sk} - (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) \quad (8)$$

### ۳- اعتبارسنجی مدل و معادلات حاکم

پیش از پرداختن به تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی افراد، لازم است که صحت معادلات، شیوه مدلسازی و عملکرد کد کامپیوتری مشخص شود. همان‌طور که گفته شد در این تحقیق از کد کامپیوتری EBSim استفاده شده است که این توانایی را دارد که پاسخ حرارتی بدن را در شرایط پایا و ناپایا مدلسازی نماید. این کد بارها مورد استفاده قرار گرفته و صحت نتایج آن به تأیید رسیده است [۶-۹]. در اینجا به سه مورد مقایسه میان نتایج مدلسازی انجام گرفته به وسیله کد حاضر و دیگر تحقیقات مشابه اشاره می‌شود.

شکل ۲-الف دمای پوست را در شرایط محیطی وابسته به زمان نشان می‌دهد. در این شرایط، افراد در ۳۰ دقیقه نخست در معرض محیطی با دمای  $30^{\circ}\text{C}$  قرار می‌گیرند. سپس به طور ناگهانی دمای محیط به  $48^{\circ}\text{C}$  می‌رسد و این شرایط به همین صورت باقی می‌ماند تا اینکه در دقیقه ۱۵۰ دمای محیط دوباره به  $30^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. در این شرایط دمای پوست پیش‌بینی شده به وسیله مدل حاضر با نتایج تجربی

<sup>10</sup> Hardy

<sup>14</sup> Ferreira

<sup>11</sup> Huizenga

<sup>15</sup> Yanagihara

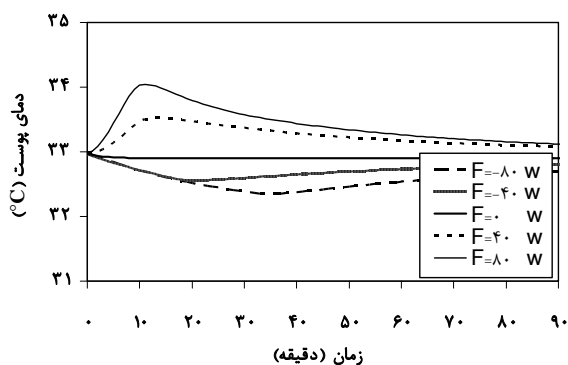
<sup>12</sup> Kaynakli

<sup>13</sup> Gordon

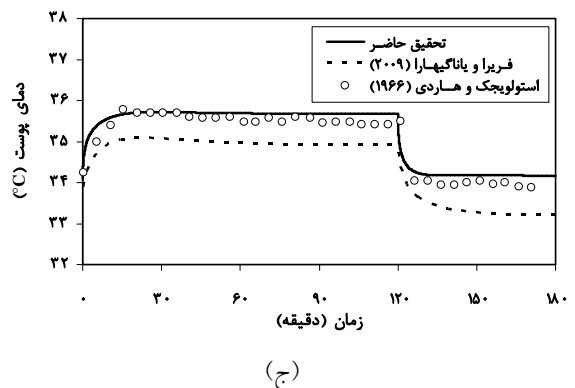
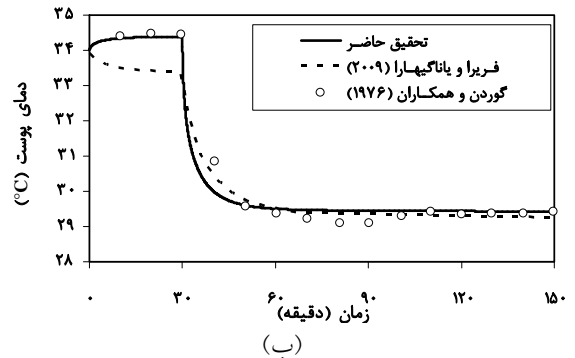
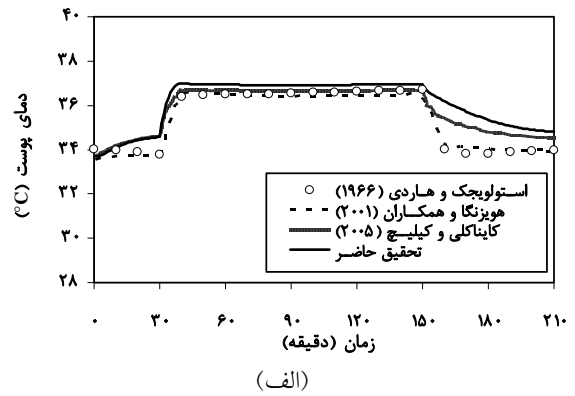
شود (معادل صرف ۲۵۰ cc سوپ داغ در مدت ۱۰ دقیقه)؛ حالتی که غذایی صرف نشود؛ خوردن غذایی سرد که سبب حدود ۴۰ W اتلاف حرارت از بدن شود (معادل خوردن ۵۰ g بستنی به مدت ۱۰ دقیقه)؛ خوردن غذایی سرد که باعث حدود ۸۰ W اتلاف حرارت از بدن شود (معادل خوردن ۱۰۰ g بستنی به مدت ۱۰ دقیقه).

در شرایطی که بدن از نظر حرارتی در وضعیت خنثی باشد، تأثیر ۵ حالت مختلف برای صرف غذا مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳ تغییرات دمای پوست را در اثر ۵ حالت مذکور نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴ نمودار مشابهی را برای دمای مرکز بدن ارائه می‌کند. ضمن اینکه در شکل ۵ تغییرات شاخص احساس حرارتی افراد در اثر ۵ حالت مختلف برای صرف غذا نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، صرف غذای سرد دمای مرکز بدن را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حالی که صرف غذای گرم بر دمای پوست اثر بیشتری دارد. برای توجیه فیزیکی این موضوع، توجه به دو نکته ضروری است: ۱. در شرایط آسایش حرارتی، همواره دمای مرکز بدن از دمای پوست بیشتر است. ۲. در مرکز بدن همواره مقداری حرارت به عنوان نرخ حرارت متابولیک تولید می‌شود. بر این اساس، مرکز بدن از نرخ متابولیک برای بالابردن و از بخش پوست به منظور پائین آوردن دمای خود استفاده می‌کند. سازوکارهای فیزیولوژیکی بدن نیز تلاش می‌کنند تا در شرایط آسایش حرارتی، میزان دفع حرارت از سطح پوست با نرخ تولید حرارت متابولیک در مرکز بدن برابر باشد.



شکل ۳- تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر دمای پوست در شرایطی که شخص در ابتدا احساس خنثی داشته باشد.



شکل ۲- دمای پوست تحت شرایط محیطی وابسته به زمان

حال که تا حدی از صحت مدل و کد کامپیوتری اطمینان حاصل شد، نتایج حاصل از بررسی تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی افراد بیان می‌شود.

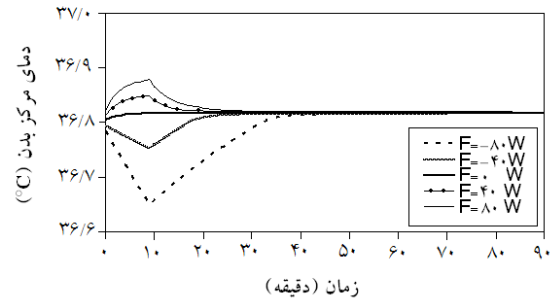
#### ۴- نتایج

در این بخش نتایج مدل‌سازی تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی بدن ارائه می‌شود. برای این منظور ۵ حالت مختلف برای صرف غذا فرض می‌گردد: خوردن غذایی گرم که باعث افزودن حدود ۸۰ W حرارت به بدن شود (معادل صرف ۵۰۰ cc سوپ داغ در مدت ۱۰ دقیقه)؛ خوردن غذایی گرم که باعث افزودن حدود ۴۰ W حرارت به بدن

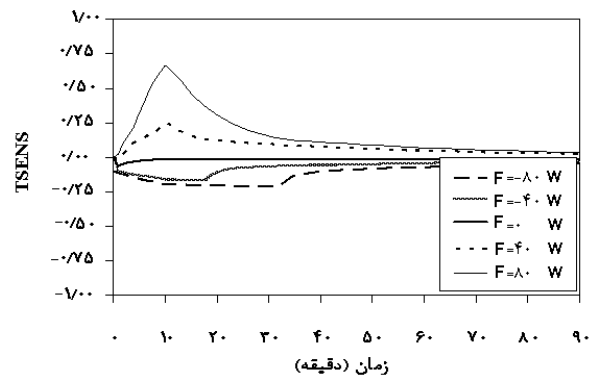
متابولیک سعی می‌کند تا دمای خود را افزایش دهد. البته بدیهیست که با پائین آمدن دمای مرکز بدن، دمای پوست نیز تا حدی افت پیدا می‌کند تا از این طریق دفع حرارت بدن به محیط کاهش یابد. اما آنچه که مسلم است، در شرایط صرف غذای سرد، بخش پوست سهم کمتری را در تنظیم حرارت بدن بر عهده خواهد داشت. همان‌طور که در منحنی شکل ۳ مشاهده می‌شود، در هنگام صرف غذای سرد، مدت زمانی که بخش پوست متأثر می‌شود، بیشتر از حالتیست که افراد غذای گرم صرف می‌کنند. این امر به این دلیل است که در هنگام صرف غذای سرد، ابتدا دمای مرکز بدن کاهش می‌یابد و مدت زمانی طول می‌کشد تا این کاهش دما به وسیله تولید حرارت متابولیک جبران شود و پس از آن مرکز بدن به حالت تعادل برسد و دمای آن دوباره برابر با دمای اولیه گردد. پس از این تعادل، نرخ حرارت متابولیک موجب می‌شود تا حرارت از بخش مرکزی به بخش پوست منتقل شود و به مرور زمان دمای پوست افزایش یابد و به مقدار اولیه خود برسد. به بیان دیگر، در شرایط صرف غذای سرد، نرخ حرارت متابولیک در ابتدا وظیفه به تعادل رساندن بخش مرکزی بدن را ایفا می‌کند و پس از آن به بخش پوست کمک می‌کند تا به شرایط تعادل حرارتی برسد. مسلم است که هرچه مقدار غذای سرد صرف شده بیشتر باشد، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا نرخ حرارت متابولیک بتواند بخش پوست را به شرایط تعادل حرارتی برساند. بنابراین در شرایط صرف غذای سرد، با افزایش مقدار غذای سرد صرف شده، کمینه منحنی‌های دمای پوست به سمت راست (زمان‌های بیشتر) متمایل می‌شود.

از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، احساس افراد در شرایط حرارتی خنثی نسبت به صرف غذاهای گرم بیشتر از غذاهای سرد متأثر می‌شود. دلیل این امر آن است که طبق رابطه (۵)، شاخص احساس حرارتی تابعی از دمای بدن ( $T_b$ ) است. همچنین دمای بدن بر اساس رابطه (۹) تابعی از دمای پوست و دمای مرکز بدن است:

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha) T_{cr} \quad (9)$$



شکل ۴- تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر دمای مرکز بدن در شرایطی که شخص در ابتدا احساس خنثی داشته باشد.

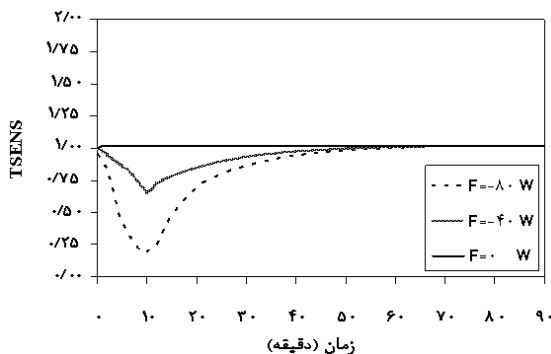


شکل ۵- تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر احساس حرارتی در شرایطی که شخص در ابتدا احساس خنثی داشته باشد.

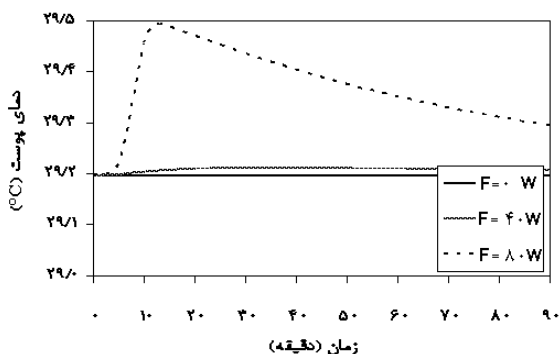
حال می‌توان روند منحنی‌های نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ را از لحاظ فیزیکی چنین توجیه کرد. هنگام صرف غذای گرم، ابتدا بخش مرکزی بدن متأثر می‌شود و از آنجا که دمای پوست از دمای مرکز بدن کمتر است، مرکز بدن برای پائین آوردن دمای خود از بخش پوست استفاده می‌کند و به تبع آن دمای پوست افزایش می‌یابد. با افزایش دمای پوست، اختلاف دمای پوست با دمای محیط زیاد می‌شود و میزان دفع حرارت از پوست به محیط افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، در شرایط صرف غذای گرم، بخش پوست نقش اصلی را در دفع حرارت ناشی از صرف غذا و تنظیم حرارت بدن بر عهده دارد.

در هنگام صرف غذای سرد، ابتدا بخش مرکزی بدن متأثر شده و دمای آن کاهش می‌یابد. ولی از آنجا که دمای پوست از دمای مرکز بدن کمتر است، بخش مرکزی بدن نمی‌تواند برای بالابردن دمای خود از بخش پوست کمک بگیرد. در این حالت، بخش مرکزی بدن با استفاده از نرخ تولید حرارت

طبق این شکل‌ها صرف غذای سرد می‌تواند سبب کاهش محسوس دمای پوست و مرکز بدن شود. از این رو، در شرایطی که شخص احساس گرما داشته باشد، صرف غذای سرد می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای احساس حرارتی شخص را از منطقه گرما به شرایط قابل قبول منتقل کند. میزان و زمان اثر صرف غذای سرد، بسته به مقدار و مدت صرف آن می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال، ۱۰ دقیقه صرف غذای سرد که باعث  $80\text{ W}$  اتلاف حرارت از بدن شود، موجب خواهد شد که شاخص احساس حرارتی TSENS از ۱ به کمتر از  $0/25$  کاهش یابد. ضمن اینکه اثرات صرف چنین غذایی تا بیش از ۳۰ دقیقه پس از صرف غذا محسوس خواهد بود. این موضوع در شکل ۸ نمایش داده شده است. همچنین پاسخ حرارتی شخص در قبال ۱۰ دقیقه صرف غذای گرم در شرایطی که شخص از نظر حرارتی در وضعیت سرد باشد بررسی شد. این امر به ازای صرف غذای گرم که موجب افزودن  $40\text{ W}$  و  $80\text{ W}$  حرارت به بدن شود انجام پذیرفته و با حالتی که غذایی صرف نشود مقایسه شده است (شکل ۹).



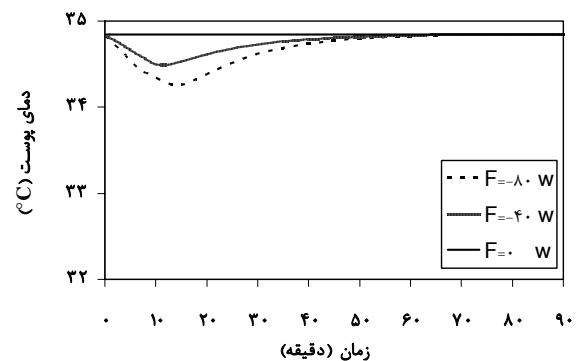
شکل ۸- اثر صرف غذای سرد بر احساس حرارتی در شرایطی که شخص در ابتدا احساس گرما داشته باشد.



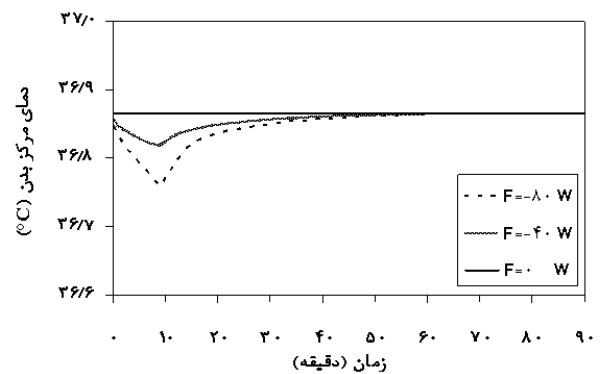
شکل ۹- تأثیر صرف غذای گرم بر دمای پوست در شرایطی که شخص در ابتدا احساس سرما داشته باشد.

که  $\alpha$  کسر تجمع جرمی در ناحیه پوست (بی‌بعد) است. اما از سویی به دلیل اینکه تغییرات دمای پوست به مراتب از تغییرات دمای مرکز بدن بیشتر است، در نتیجه تغییرات دمای بدن به طور چشمگیری به تغییرات دمای پوست وابسته است و بنابراین روند منحنی شاخص احساس آسایش حرارتی به طور محسوسی از روند منحنی تغییرات دمای پوست تبعیت می‌کند.

در شرایطی که شخص از نظر حرارتی در وضعیت گرم باشد و به عبارت دیگر احساس گرما کند، پاسخ حرارتی شخص در قبال ۱۰ دقیقه صرف غذای سرد مورد بررسی قرار گرفته است. این امر به ازای صرف غذای سرد که باعث  $40\text{ W}$  و  $80\text{ W}$  اتلاف حرارت از بدن شود انجام پذیرفته و با حالتی که غذایی صرف نشود مقایسه شده است. شکل ۶ تغییرات دمای پوست را در اثر صرف غذای سرد در حالت‌های ذکر شده نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۷ نمودار مشابهی برای دمای مرکز بدن ارائه شده است.



شکل ۶- اثر صرف غذای سرد بر دمای پوست در شرایطی که شخص در ابتدا احساس گرما داشته باشد.



شکل ۷- اثر صرف غذای سرد بر دمای مرکز بدن در شرایطی که شخص در ابتدا احساس گرما داشته باشد.



## ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر تأثیر صرف غذای سرد یا گرم بر پاسخ حرارتی بدن مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین نتایج به دست آمده چنین است:

الف) صرف غذای سرد یا گرم می تواند احساس حرارتی افراد را به طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد که این تأثیر تا زمان قابل توجهی پس از صرف غذا نیز مشاهده می شود.

ب) در شرایطی که بدن از نظر حرارتی در وضعیت خنثاست صرف غذای سرد دمای مرکز بدن را بیشتر تحت تأثیر قرار می دهد در حالی که صرف غذای گرم بر دمای پوست اثر بیشتری دارد. ضمن اینکه احساس افراد در شرایط حرارتی خنثی نسبت به صرف غذاهای گرم حساس تر است. به طوری که صرف غذاهای گرم می تواند احساس حرارتی افراد را از حالت خنثی به حالت احساس گرما تغییر دهد. در حالی که صرف غذاهای سرد نمی تواند تغییر چشمگیری در احساس حرارتی افراد و خروج از منطقه خنثی ایجاد کند.

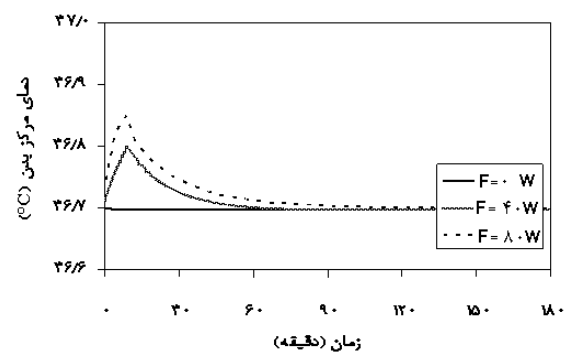
ج) در شرایطی که شخص احساس گرما کند، صرف غذای سرد می تواند سبب کاهش محسوسی در دمای پوست و مرکز بدن شود و احساس حرارتی شخص را به طور قابل ملاحظه ای از منطقه گرما به شرایط قابل قبول منتقل نماید. ضمن این که صرف غذای سرد در شرایط احساس گرما، تا زمان نسبتاً طولانی پس از صرف غذا (تا ۳ برابر زمان صرف غذا) بر احساس حرارتی شخص مؤثر است.

د) در شرایطی که شخص از نظر حرارتی در وضعیت سرد باشد، صرف غذای گرم بیشتر موجب افزایش دمای بخش مرکزی می شود در حالی که دمای پوست را چندان متأثر نمی کند. همچنین اثر صرف غذای گرم در شرایط احساس سرما، حدوداً پس از گذشت زمانی معادل با زمان صرف غذا از بین می رود.

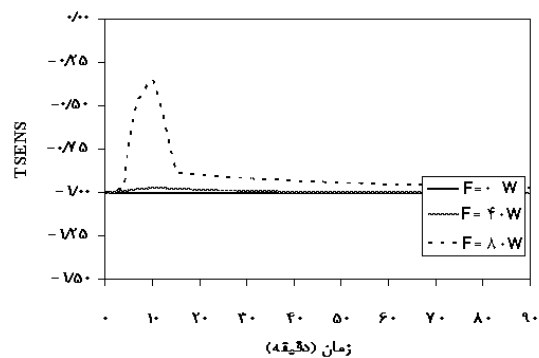
## علائم اختصاری

$A_D$	سطح بدن ( $m^2$ )
$C_F$	ظرفیت گرمایی غذای مصرفی ( $J/kg.K$ )
$C_{p,b}$	ظرفیت گرمایی بدن ( $J/kg.K$ )
$C_{sk}$	انتقال حرارت جابه جایی از پوست ( $W/m^2$ )

همچنین شکل ۱۰ نمودار تغییرات دمای پوست در اثر صرف غذای گرم را ارائه می کند. همان طور که مشاهده می شود در شرایطی که شخص احساس سرما دارد، به دلیل اینکه دمای بخش مرکزی بدن نسبت به حالت خنثی پائین تر است؛ حرارت ناشی از صرف غذای گرم موجب افزایش دمای مرکز بدن می شود و اثر قابل ملاحظه ای بر دمای پوست نمی گذارد. بنابراین در شرایطی که شخص احساس سرما داشته باشد، صرف غذای گرم دمای بخش مرکزی بالا برده و به این ترتیب احساس حرارتی شخص را از منطقه سرما به شرایط قابل قبول نزدیک می نماید (شکل ۱۱). میزان و زمان تأثیر صرف غذای گرم نیز به مقدار و مدت صرف آن وابسته است. به عنوان مثال، ۱۰ دقیقه صرف غذایی گرم که باعث افزودن حدود  $80W$  حرارت به بدن شود، موجب خواهد شد که شاخص احساس حرارتی TSENS از ۱- به حدود  $-0.25$  افزایش یابد. ضمن اینکه اثرات صرف چنین غذایی تا حدود ۱۰ دقیقه پس از صرف غذا محسوس خواهد بود.



شکل ۱۰- تأثیر صرف غذای گرم بر دمای مرکز بدن در شرایطی که شخص در ابتدا احساس سرما داشته باشد.



شکل ۱۱- تأثیر صرف غذای گرم بر احساس حرارتی در شرایطی که شخص در ابتدا احساس سرما داشته باشد.

[۷] ذوالفقاری سید علیرضا، معرفت مهدی؛ مدل سازی و تحلیل ناپایایی پاسخ حرارتی بدن انسان در هنگام خواب؛ هفدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۸.

[۸] ذوالفقاری سید علیرضا، معرفت مهدی؛ ارائه مدلی جدید به منظور ارزیابی احساس حرارتی افراد در هنگام خواب؛ هفدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۸.

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

[10] Imre L., Bitai A., Horvath C.D., Banhidi L., Pammer Z., Thermal analysis of human body clothing environment system, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1988; 25: 357-371.

[11] Stolwijk J.A.J., A mathematical model of physiological temperature regulation in man, USA (Washington, DC): National Aeronautics and Space Administration, 1971; NASA contractor report, NASA CR-1855).

[12] Yigit A., Combining thermal comfort models, *ASHRAE Transaction*, 1999; 105 (1):149-158.

[13] Kaynakli O., Unver U., Kilic M., Evaluating thermal environments for sitting and standing posture, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2003; 30 (8): 1179-1188.

[14] Kaynakli O., Kilic M., Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions, *Building and Environment*, 2005; 40:165-174.

[15] Stolwijk J.A.J., Hardy J.D., Temperature regulation in man-a theoretical study, *Gesamte Physiology*, 1966; 291: 129-162.

[16] Huizenga C., Zhang H., Arens E., A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments, *Building and Environment*, 2001; 36: 691-699.

[17] Gordon R.G., Roemer R.B., Horvath S.M., A mathematical model of the human temperature regulatory system-transient cold exposure response, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1976; 23 (6): 434-444.

[18] Ferreira M.S., Yanagihara J.I., A transient three dimensional heat transfer model of the human body, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009; 36 (7): 718-724.

[19] Stolwijk J.A.J., Hardy J.D., Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients, *Journal of Applied Physiology*, 1966; 21(3): 967-977.

$E_{sk}$	اتلاف حرارت تبخیری از پوست ( $W/m^2$ )
$F$	انتقال حرارت محسوس در اثر صرف غذا ( $W$ )
$M$	نرخ متابولیک ( $W/m^2$ )
$m$	جرم بدن ( $kg$ )
$m_F$	جرم غذای مصرفی ( $kg$ )
$Q_{cr,sk}$	میزان تبادل حرارت میان بخش مرکزی ( $W/m^2$ )
$Q_{res}$	اتلاف حرارت از طریق تنفس ( $W/m^2$ )
$R_{sk}$	اتلاف حرارت تابشی از پوست ( $W/m^2$ )
$S_{cr}$	میزان ذخیره حرارت در بخش مرکزی ( $W/m^2$ )
$S_{sk}$	میزان ذخیره حرارت در بخش پوست ( $W/m^2$ )
$T_{cr}$	دمای مرکز بدن ( $^{\circ}C$ )
$T_F$	دمای متوسط غذا ( $^{\circ}C$ )
$T_{sk}$	دمای پوست ( $^{\circ}C$ )
TSENS	پارامتر احساس حرارتی (بی بعد)
$W$	نرخ کار انجام شده توسط شخص ( $W/m^2$ )
$\alpha$	کسر تجمع گرمی در ناحیه پوست (بی بعد)
$\theta$	زمان ( $s$ )

## مراجع

- [1] Jones B.W., Capabilities and limitations of thermal models for use in thermal comfort standards, *Energy and Buildings*, 2002; 34: 653-659.
- [2] Fanger P.O., *Thermal comfort analysis and application in environmental engineering*, USA (New York): McGraw-Hill; 1970: 19-67.
- [3] Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Nishi Y., An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Transactions*, 1997; 77 (1): 247-262.
- [4] ASHRAE; *ASHRAE Fundamentals Handbook (SI)*; USA (Atlanta): American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers Inc; 2001: 8.1-8.29.
- [5] Höppe P.R., *Heat balance modeling*, *Experientia*, 1993; 49: 741-746.

[۶] ذوالفقاری سید علیرضا، معرفت مهدی، امیدوار امیر؛ مدل سازی و تحلیل پاسخ حرارتی بدن انسان در برابر تابش های شدت بالا؛ شانزدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۷.