مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۳، ص‌ص ۱۶۷-۱۷۵

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارزیابی اثرات ذخیره حرارت و رطوبت در لباس و اصلاح مدل گایج برای پیش‌بینی احساس حرارتی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن

امیر امیدوار[۱*]، بابک افرا[۲]

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد ، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی ۳۱۳-۷۱۵۵۵، omidvar@sutech.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۰ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۴ آبان ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

آسایش حرارتی

انتقال حرارت و رطوبت

لباس

چکیده

تاکنون مدل‌های آسایش حرارتی زیادی برای پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن به تغییر در شرایط فردی و محیطی ارائه شده است که در این میان مدل گایج به دلیل تخمین پاسخ‌های فیزیولوژیکی و احساس حرارتی افراد در شرایط گذرا به یکی از پرکاربردترین مدل‌های آسایش حرارتی تبدیل شده است. این مدل اگرچه از سازوکارهای گذرا برای تعیین دمای مرکز بدن و دمای سطح پوست استفاده می‌کند، اما در ساختار آن از فرضیات ساده کننده‌ای نظیر پایا بودن انتقال حرارت و رطوبت در لباس و نادیده انگاشتن اینرسی حرارتی و جرمی در لباس استفاده شده است. به نظر می‌رسد که این فرضیات ساده کننده تا حدودی با ساختار گذرای مدل گایج که مهم‌ترین حسن آن نیز محسوب می‌شود، در تضاد است. این پژوهش با بررسی سازوکارهای مختلف برای انتقال انرژی و رطوبت در لباس (انتقال انرژی پایا- انتقال جرم پایا، انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا و انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم شبه گذرا) تلاش می‌کند میزان انحراف پاسخ حرارتی پیش‌بینی شده توسط این مدل‌سازی‌ها را از مقادیر برآمده از کارهای تجربی بررسی نماید. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود مدل‌سازی با در نظر گرفتن اثرات گذرای انتقال انرژی و شبه گذرای جرم در لباس است.

Evaluation of thermal and moisture inertia effects in clothing and Gagge's model modification for body thermal sensation and physiological responses estimation

Amir Omidvar[1*], Babak Afra[2]

1- Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.
2- M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.
*P.O.B. 71555-313 Shiraz, omidvar@sutech.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 October 2013
Accepted 26 October 2013
Available Online 17 May 2014

Keywords:
Thermal Comfort
Heat and Moisture Transfer
Clothing

ABSTRACT

Up to now, lots of thermal comfort models have been introduced to predict human being's body thermal response to the changes in personal and environmental conditions. Among them, Gagge's model because of its ability in estimating body physiological responses and thermal sensation in transient conditions has turned to one of the most used thermal comfort models. Though this model uses transient mechanisms to determine body core and skin temperatures, yet simplified assumptions like steady heat and moisture transfer through clothing and disregarding thermal and mass inertia in the garments are still included. This study, by investigating various mechanisms of heat and moisture transfer in the clothing (steady heat and mass transfer, transient heat transfer-steady mass transfer, transient heat transfer-semi transient mass transfer) tries to compare upcoming results of such models with those of experiments. It was declared that considering transient heat transfer along with semi transient mass transfer in the clothing have positive effects on the results.

۱- مقدمه

مدل‌سازی عددی و بررسی تجربی پارامترهای اساسی و مؤثر در پدیده انتقال حرارت از بدن و به دنبال آن آسایش حرارتی افراد، موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر بوده است. در این میان مدل آسایش حرارتی گایج[۱] به دلیل سادگی و همچنین ارائه نتایج نسبتاً منطبق بر نتایج تجربی به عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های گذرا در تقریب آسایش حرارتی مطرح شده است.

یکی از نواقص اصلی مدل گایج را می‌توان در فرض ساده‌ساز آن در مدل‌سازی لباس دانست. لباس صرف‌نظر از اینکه به عنوان پوششی برای ایجاد زیبایی ظاهری و جلوگیری از صدمات خارجی به بدن در نظر گرفته

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

می‌شود، می‌تواند به عنوان عامل مهمی در چگونگی پاسخ حرارتی بدن نسبت به محیط اطراف و عملکرد سیستم تنظیم حرارتی[1] آن نیز در نظر گرفته شود. در واقع لباس با ایجاد حجم کنترلی کوچک در اطراف بدن، تحت تأثیر پارامترهای محیطی و فردی مختلف، می‌تواند تأثیری مستقیم در نحوه عملکرد سیستم تنظیم حرارتی بدن داشته باشد. تمامی معادلات ساختاری ارائه شده در مدل گایج به صورت گذرا در نظر گرفته شده‌اند و این در حالی است که این مدل نه تنها انتقال حرارت در لباس را به صورت پایا در نظر می‌گیرد، بلکه از اثرات انتقال جرم گذرای ناشی از تبخیر تعریق نیز صرف‌نظر می‌کند. در نظر گرفتن سازوکار پایا برای انتقال حرارت در لباس عملاً با ساختار گذرای این مدل در تقابل است و اصلاح آن در کنار افزودن اثرات اینرسی جرمی بر انتقال رطوبت در لباس می‌تواند در بهبود نتایج حاصل از مدل‌سازی مؤثر باشد.

بدن انسان انرژی جذب شده توسط مواد غذایی را، بسته به میزان فعالیت بدنی، به کار و حرارت تبدیل می‌کند. از آنجایی که افزایش بیش از حد دمای مرکز بدن به ایجاد آسیب‌های جدی می‌انجامد، حرارت تولید شده باید به نحوی به محیط اطراف منتقل شود. این انتقال حرارت از طریق سیگنال‌های حرارتی بدن، که توسط گیرنده‌های دمایی[2] پوست ارسال می‌شوند، کنترل می‌شود. این فرآیند کنترلی از طریق چهار سازوکار اتساع عروق، انقباض عروق، تعریق و لرز، تولید حرارت و انتقال آن بین بدن و محیط اطراف را عملی می‌سازد[۲]. با توجه به این حقیقت که بخش اصلی فرآیند انتقال حرارت بدن به محیط اطراف از طریق پوست صورت می‌گیرد و همزمان بخش زیادی از پوست را لباس می‌پوشاند، انتقال حرارت بدن تا حد بسیار زیادی به چگونگی انتقال حرارت و رطوبت از لباس وابسته است. برای مثال هنگامی که دمای بدن از حد معینی بالاتر می‌رود، سیستم تنظیم حرارتی بدن با واداشتن غدد تعریقی به تولید عرق، تلاش می‌کند با راهکار سرمایش تعریقی دمای آن را به حالت عادی برگرداند و از آن جایی که لباس در فاصله کمی از سطح پوست قرار گرفته است، مستقیماً در میزان نفوذ و پخش بخار آب (تعریق) اثر می‌گذارد[۳].

تاکنون مطالعات متنوعی در زمینه به کارگیری همزمان معادلات انتقال حرارت و جرم در لباس صورت گرفته است که در بخش زیادی از این مطالعات، لباس به صورت محیطی متخلخل در نظر گرفته شده است. آگنیویچ و تی ین[۴] با در نظر گرفتن مدلی پایا و یک بعدی برای پوشش‌ها و با فرض محیط متخلخل، به بررسی پدیده چگالش و تغییر فاز در پوشش‌ها پرداختند. مدل گذرای همین مسئله را شاپیرو و معتکف[۵] بررسی نمودند. در سال ۲۰۰۱ میلادی، حقی[۶] با به‌کارگیری معادلات گذرای انتقال حرارت و جرم در لباس و با فرض محیط متخلخل، به ارائه مدلی پرداخت که قابلیت ارزیابی تأثیر پارامترهایی مانند خصوصیات فیزیکی لباس، میزان رطوبت اولیه آن و رطوبت هوای محیط را داشت. پاسدار و همکاران نیز اثر پارامترهای اصلی لباس، مانند ضریب تخلخل، ضریب نفوذ پذیری و ضریب هدایت حرارتی الیاف را بر اتلاف‌های حرارت تبخیری و میزان تری لباس مطالعه کردند[۷]. علاوه بر تحقیقات یاد شده، بخش وسیع دیگری از این مطالعات نیز روی لباس‌های چند لایه انجام شده است؛ فان و چنگ[۸]، وا و فان[۹] و همچنین ویسلر و هاونیس[۱۰] به ارائه جزئیات مربوط به مدل‌های دینامیک برای تحلیل انتقال حرارت و جرم در لباس‌های چند لایه پرداختند.

به‌کارگیری همزمان معادلات انتقال حرارت و جرم در لباس در کنار معادلات مربوط به سیستم تنظیم حرارتی بدن را نیز می‌توان در بسیاری از مطالعات منتشر شده یافت. لی و هالکومب[۱۱] با به کار بردن همزمان مدلی ارتقاء یافته از مدل آسایش حرارتی گایج و معادلات انتقال حرارت و جرم در لباس نشان دادند که دمای پوست، دمای لباس و رطوبت نسبی لباس محاسبه شده توسط آن مدل با نتایج تجربی تطابق مناسبی دارد. فیالا و همکاران[۱۲] با مدل‌سازی سیستم تنظیم حرارتی بدن و در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی که می‌توانند در احساس حرارتی افراد تأثیرگذار باشند (از جمله مدل‌سازی لباس) به ارائه مدل جدیدی پرداختند. کلکار و همکاران[۱۳] با به‌کارگیری مانکنی، که قابلیت شبیه‌سازی پاسخ حرارتی بدن به شرایط مختلف محیطی را داشت، اثر لباس‌های رسمی مردانه بر احساس آسایش حرارتی افراد را مطالعه نمودند. ذوالفقاری و معرفت[۱۴] نیز به ارائه مدلی سه نقطه‌ای پرداختند که سیستم مورد مطالعه را به بخش‌های هسته بدن، قسمت پوشیده شده پوست با لباس و قسمت بدون لباس پوست تقسیم و برای هر بخش معادلات انرژی گذرا را حل می‌کرد.

در این مقاله، اثر مدل‌سازی لباس در پیش‌بینی پاسخ حرارتی بدن به تغییر در شرایط محیطی بررسی و نشان داده می‌شود که در نظر گرفتن لباس به عنوان پوششی که در آن سازوکارهای انتقال حرارت و جرم به ترتیب به صورت گذرا و شبه‌گذرا صورت می‌گیرند، تا چه حد می‌تواند نتایج برآمده از مدل گایج را که در آن سازوکارهای انتقال حرارت و رطوبت به صورت پایا در نظر گرفته می‌شوند، بهبود ببخشد.

۲- سازوکارهای انتقال انرژی و جرم در لباس

۲-۱- انتقال انرژی پایا-انتقال جرم پایا (مدل گایج رایج)

گایج در سال ۱۹۸۶ مدل آسایش حرارتی خود را که مبتنی بر سیگنال‌های حرارتی بود، ارائه نمود[۱۵]. این مدل بدن را به صورت دو استوانه هم مرکز (دو لایه) در نظر می‌گیرد که استوانه داخلی معرف مرکز بدن و استوانه خارجی معرف پوست بدن است و ارتباط بین این دو بخش از طریق تماس مستقیم و جریان خون برقرار می‌شود. در این مدل، لباس به صورت لایه‌ای یکنواخت و بدون اینرسی حرارتی که تمام قسمت‌های بدن را پوشانده است در نظر گرفته می‌شود و در واقع هیچ‌گونه معادله‌ای برای انتقال حرارت و رطوبت از این لایه لباس حل نمی‌شود. معادلات موازنه انرژی این مدل برای مرکز و پوست بدن به صورت معادلات (۱) و (۲) تعریف می‌شوند[۱۴]:

$$\frac{(1-\alpha)m_{\mathrm{b}}c_{\mathrm{p,b}}}{A_{\mathrm{D}}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{cr}}}{\mathrm{d}t}=M-W-Q_{\mathrm{res}}-Q_{\mathrm{cr\text{-}sk}} \quad (۱)$$

$$\frac{\alpha m_{\mathrm{b}}c_{\mathrm{p,b}}}{A_{\mathrm{D}}}\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{sk}}}{\mathrm{d}t}=Q_{\mathrm{cr\text{-}sk}}-(Q_{\mathrm{evap}}+Q_{\mathrm{conv}}+Q_{\mathrm{rad}}) \quad (۲)$$

که در آن T_{cr} و T_{sk} به ترتیب دمای مرکز بدن و دمای سطح پوست هستند ($^{\circ}\mathrm{C}$)؛ A_D که مساحت دوبویز[3] نامیده می‌شود و معرف مساحت سطح بدون لباس بدن است، از رابطه (۳) برآورد می‌شود[۱۶]:

$$A_{\mathrm{D}}=0.202m_{\mathrm{b}}^{0.425}l^{0.725} \quad (۳)$$

انتقال حرارت از بدن از طریق سازوکار تنفس (Q_{res})، انتقال حرارت محسوس بین بدن و محیط اطراف از طریق جابجایی و تابش ($Q_{\mathrm{conv}}+Q_{\mathrm{rad}}$) و انتقال حرارت نهان از بدن در اثر تبخیر عرق (Q_{evap}) بر اساس روابط (۴) تا (۶) قابل محاسبه می‌باشند[۲]:

$$Q_{\mathrm{res}}=0.0014M(34-t_{\mathrm{a}})+0.0173M(5.87-P_{\mathrm{a}}) \quad (۴)$$

$$Q_{\mathrm{conv}}+Q_{\mathrm{rad}}=\frac{T_{\mathrm{sk}}-T_{\mathrm{cl}}}{R_{\mathrm{cl}}} \quad (۵)$$

1- Thermoregulatory System
2- Thermoreceptors
3- Dubois Surface Area

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

$$Q_{evap} = wQ_{evap,max} \quad (۶)$$

که در رابطه (۶) مقدار $Q_{evap,max}$ از طریق رابطه (۷) برآورد می‌شود[۲]:

$$Q_{evap,max} = \frac{P_{sat,sk} - P_a}{R_{e,t}} \quad (۷)$$

همچنین w معرف میزان رطوبت یا اصطلاحاً تری پوست است که در ادامه چگونگی محاسبه آن ارائه می‌شود. در رابطه (۷)، $P_{sat,sk}$، P_a و $R_{e,t}$ به ترتیب معرف فشار بخار آب در هوای اشباع و در دمای پوست (kPa)، فشار بخار آب در هوا (kPa) و مقاومت تبخیری کل بین بدن و محیط اطراف (m^2kPa/W) هستند.

بر اساس آنچه که گایج ارائه می‌دهد پاسخ حرارتی بدن به تغییر در شرایط فردی و محیطی از طریق سیگنال‌هایی که عکس‌العمل‌های ترموفیزیولوژیکی بدن (اتساع و انقباض عروق، تعرق و لرز) را به دنبال دارند، کنترل می‌شود. گایج این سیگنال‌ها را، که عملاً موتور محرک برای فعال شدن فرآیندهای کنترلی دمای بدن هستند، به صورت روابط (۸) تا (۱۲) معرفی کرده است[۱۷]:

$$WSIG_{cr} = \max\{(T_{cr} - T_{cr,n}), 0\} \quad (۸)$$

$$WSIG_{sk} = \max\{(T_{sk} - T_{sk,n}), 0\} \quad (۹)$$

$$CSIG_{cr} = \max\{(T_{cr,n} - T_{cr}), 0\} \quad (۱۰)$$

$$CSIG_{sk} = \max\{(T_{sk,n} - T_{sk}), 0\} \quad (۱۱)$$

$$WSIG_b = \max\{(T_b - T_{b,n}), 0\} \quad (۱۲)$$

که $WSIG_{cr}$ سیگنال گرم مرکز بدن، $WSIG_{sk}$ سیگنال گرم پوست، $CSIG_{cr}$ سیگنال سرد مرکز بدن، $CSIG_{sk}$ سیگنال سرد پوست و $WSIG_b$ سیگنال گرم کل بدن است. همچنین $T_{cr,n}$ و $T_{sk,n}$ به ترتیب بیانگر دمای مرکز بدن و دمای پوست در حالت خنثی هستند:

$$T_{cr,n} = 36.8\ ^\circ C \quad (۱۳)$$

$$T_{sk,n} = 33.7\ ^\circ C \quad (۱۴)$$

در رابطه (۱۲) نیز T_b و $T_{b,n}$ که به ترتیب معرف دمای بدن و دمای حالت خنثی بدن ($^\circ C$) هستند از روابط (۱۵) و (۱۶) قابل محاسبه هستند[۲]:

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1-\alpha) T_{cr} \quad (۱۵)$$

$$T_{b,n} = \alpha T_{sk,n} + (1-\alpha) T_{cr,n} \quad (۱۶)$$

با در اختیار داشتن این سیگنال‌ها می‌توان پارامتر بدون بعد α را، که بیانگر کسری از جرم بدن است که در لایه‌ی پوست متمرکز شده است، تعیین نمود[۲]:

$$\alpha = 0.042 + \frac{0.745}{3600\dot{m}_{bl} + 0.585} \quad (۱۷)$$

که در آن $\dot{m}_{bl}$ نرخ جریان خون (kg/m^2s) است و به صورت تابعی از سیگنال‌های حرارتی تعریف می‌شود[۲]:

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200WSIG_{cr}}{3600(1 + 0.5CSIG_{sk})} \quad (۱۸)$$

در واقع بدن با فعال کردن سازوکارهای اتساع و انقباض عروق، نرخ جریان خون عبوری از رگ‌ها را تغییر می‌دهد تا از این طریق دمای بدن را کنترل نماید.

در مدل دو لایه‌ای گایج، انتقال حرارت بین دو بخش مرکزی بدن و پوست از طریق سازوکار هدایت و همچنین از طریق جریان خون صورت می‌گیرد[۱۴]:

$$Q_{cr\text{-}sk} = (K + c_{p,bl}\dot{m}_{bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (۱۹)$$

که K میزان مؤثر ضریب انتقال حرارت هدایت بدن و $c_{p,bl}$ گرمای ویژه خون است که به ترتیب برابر با (W/m^2K) ۵/۲۸ و ($J/kg^\circ C$) ۴۱۸۷ در نظر گرفته می‌شوند.

یکی دیگر از سازوکارهای کنترل دمای بدن، سرمایش تعریقی است. در عمل، بالا رفتن دمای بدن منجر به افزایش میزان ترشح غدد تعریقی و در نتیجه مرطوب شدن سطح پوست می‌شود؛ تبخیر این رطوبت از سطح پوست، نهایتاً به دفع حرارت از بدن و کاهش دمای آن می‌انجامد. مقدار حرارت منتقل شده توسط سرمایش تبخیری از رابطه (۲۰) قابل محاسبه است[۲]:

$$Q_{rsw} = \dot{m}_{rsw} h_{fg} \quad (۲۰)$$

که $\dot{m}_{rsw}$ نرخ تولید عرق بر واحد سطح پوست (kg/m^2s) است و از رابطه (۲۱) بدست می‌آید[۲]:

$$\dot{m}_{rsw} = 4.72\times10^{-5} WSIG_b \exp(WSIG_{sk}/10.7) \quad (۲۱)$$

همچنین مقدار کل رطوبت موجود در سطح پوست (w) از روابط (۲۲) برآورد می‌شود[۲]:

$$w = w_{rsw} + 0.06(1 - w_{rsw}) \quad (۲۲\text{-الف})$$

$$w_{rsw} = 0.06 + 0.94\frac{Q_{rsw}}{Q_{evap,max}} \quad (۲۲\text{-ب})$$

دیگر سازوکار موجود در مدل گایج، سازوکار ایجاد لرز در بدن تحت تأثیر سیگنال‌های سرد دریافت شده از بخش مرکزی و پوست بدن است. بر این اساس، بدن با دریافت سیگنال‌های سرد، ماهیچه‌های خود را به ارتعاش و لرزش وامی‌دارد تا از این طریق نرخ متابولیک افزایش یابد. تولید متابولیک در اثر لرز را می‌توان از طریق سیگنال‌های سرد مرکز بدن و پوست محاسبه نمود[۱۴]:

$$M_{shiv} = 19.4\, CSIG_{sk} CSIG_{cr} \quad (۲۳)$$

بنابراین، متابولیک را می‌توان به صورت مجموع متابولیک ناشی از فعالیت بدنی (M_{act}) و متابولیک ناشی از سازوکار لرز (M_{shiv}) در نظر گرفت[۱۴]:

$$M = M_{act} + M_{shiv} \quad (۲۴)$$

در نهایت مدل گایج با تعریف شاخص $TSENS$ احساس حرارتی افراد را به صورت شاخصی بدون بعد ارائه می‌دهد. این معیار که به صورت معادلات زیر ارائه می‌شود، دامنه احساس حرارتی افراد را از ۵- تا ۵+ تقسیم می‌کند؛ بر اساس این معیار، ۵- بیانگر سرمای غیر قابل تحمل، ۴- ، خیلی سرد، ۳- ، سرد، ۲- ، خنک، ۱- ، کمی خنک، ۱+ ، کمی گرم، ۲+ ، گرم، ۳+ ، داغ، ۴+ ، خیلی داغ و ۵+، گرمای غیر قابل تحمل است. همچنین حالت $TSENS = 0$ مربوط به احساس حرارتی خنثی است[۱۸]:

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & T_b < T_{b,c} \\ 0.47\eta_e(T_b - T_{b,c})/(T_{b,h} - T_{b,c}) & T_{b,c} \le T_b \le T_{b,h} \\ 0.47\eta_e + 0.685(T_b - T_{b,h}) & T_{b,h} \le T_b \end{cases} \quad (۲۵\text{-الف})$$

$$T_{b,c} = 0.194(M - W) + 36.301 \quad (۲۵\text{-ب})$$

$$T_{b,h} = 0.347(M - W) + 36.669 \quad (۲۵\text{-ج})$$

پارامتر η_e بازدهی تبخیری نامیده می‌شود و معمولاً ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا

در مدل گایج اثرات لباس در محاسبات تنها به در نظر گرفتن مقاومت حرارتی (R_{cl}) آن محدود می‌شود. به عبارت دیگر، در مدل گایج انتقال انرژی در لباس به صورت پایا در نظر گرفته می‌شود و از اینرسی یا لختی حرارتی لباس صرف‌نظر می‌شود. چنین فرضی از دو جهت قابل تأمل است؛ نخست اینکه، مدل گایج اساساً برای پیش‌بینی شرایط گذرا ارائه شده است و در نظر

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

گرفتن چنین فرضی برای لباس اصولاً با ساختار گذرای مدل همخوانی ندارد. دوم اینکه، بر اساس آنچه که گایج ارائه می‌دهد لباس‌هایی که ظرفیت‌های گرمایی مختلفی دارند اما مقاومت حرارتی یکسانی دارند تأثیری مشابه بر احساس حرارتی افراد می‌گذارند و این در حالی است که انتظار می‌رود لباس-هایی که $m_{cl}c_{p,cl}$ های مختلفی دارند، تأثیرات متفاوتی نیز بر احساس حرارتی افراد داشته باشند[۱۹].

بر اساس آنچه که ذکر شد، می‌توان انتظار داشت که با افزودن معادله دیگری به معادلات (۱) و (۲) می‌توان مدل‌سازی انجام شده توسط گایج را تا حدودی بهبود بخشید و یا حداقل میزان تأثیر فرض ساده کننده پایا بودن انتقال حرارت در لباس و نادیده انگاشتن لختی حرارتی آن را بر دقت نتایج ارزیابی نمود.

با در نظر گرفتن معادله موازنه انرژی برای لباس در کنار معادلات موازنه انرژی در بدن می‌توان نوشت:

$$\frac{(1-\alpha)m_b c_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{cr}}{dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr\text{-}sk} \quad (۲۶)$$

$$\frac{\alpha m_b c_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{sk}}{dt} = Q_{cr\text{-}sk} - (Q_{sk\text{-}cl} + Q_{evap}) \quad (۲۷)$$

$$\frac{m_{cl}c_{p,cl}}{A_D f_{cl}}\frac{dT_{cl}}{dt} = Q_{sk\text{-}cl} - (Q_{conv} + Q_{rad}) \quad (۲۸)$$

که در آن T_{cl} دمای لباس است (°C)؛ f_{cl} ضریب مساحت لباس نامیده و به صورت رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود[۱۴]:

$$f_{cl} = 1 + 0.31\left(\frac{R_{cl}}{0.155}\right) \quad (۲۹)$$

مقدار انتقال حرارت هدایت بین پوست و لباس را نیز می‌توان بر اساس دمای پوست، دمای لباس و مقاومت حرارتی لباس تعریف نمود[۱۴]:

$$Q_{sk\text{-}cl} = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{R_{cl}} \quad (۳۰)$$

همچنین برای تعیین مقدار انتقال حرارت تابشی (Q_{rad}) و جابجایی (Q_{conv}) بین لباس و محیط اطراف می‌توان نوشت[۱۴]:

$$Q_{rad} = f_{cl} f_r h_r (T_{cl} - T_{mrt}) \quad (۳۱)$$

$$Q_{conv} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (۳۲)$$

که h_r و h_c به ترتیب ضریب انتقال حرارت تابشی و جابجایی ($W/m^2\,°C$) هستند. پارامتر بی بعد f_r نیز ضریب کاهش[1] نامیده می‌شود که به منظور اعمال اثرات تابشی برخی از قسمت‌های بدن بر سایر قسمت‌های آن در رابطه (۳۱) وارد شده است[۱۴].

به این ترتیب مدل دو لایه‌ای گایج به مدلی سه لایه‌ای ارتقاء می‌یابد که در آن دو لایه‌ی داخلی معرف مرکز و پوست بدن هستند و لایه خارجی معرف لباس است. در معادله (۲۸) انتقال حرارت از لایه لباس به صورت گذرا در نظر گرفته شده و ظرفیت گرمایی آن نیز به عنوان یکی دیگر از پارامترهای ساختاری لباس در محاسبات لحاظ شده است. همچنین این معادله بر این فرض استوار است که بخشی از شار حرارتی ناشی از تبخیر رطوبت پوست که به لباس وارد می‌شود، با شار حرارتی ناشی از تبخیر رطوبت لباس که به محیط اطراف وارد می‌شود برابر است؛ به عبارت دیگر، معادله (۲۸) سازوکار انتقال جرم در لباس را به صورت پایا در نظر می‌گیرد.

۲-۳- انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم شبه گذرا

اگرچه در نظر گرفتن معادله گذرای انرژی برای لباس شرایط مدل‌سازی گایج را تا حدودی به واقعیت نزدیک‌تر می‌سازد، اما افزودن سازوکار انتقال جرم شبه گذرا در لباس نیز می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری از احساس حرارتی افراد ارائه دهد. برای این منظور شارهای حرارتی مربوط به انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست به لباس ($Q_{evap,sk\text{-}cl}$) و از لباس به محیط اطراف ($Q_{evap,cl\text{-}env}$) را باید به معادلات دیفرانسیل ارائه شده در بخش قبل افزود و به نوعی مقدار رطوبت موجود در لباس را در هر لحظه تعیین نمود[۳]. معادلات (۳۳)، (۳۴) و (۳۵) بیانگر معادلات دیفرانسیل اساسی برای چنین رویکردی است:

$$\frac{(1-\alpha)m_b c_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{cr}}{dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr\text{-}sk} \quad (۳۳)$$

$$\frac{\alpha m_b c_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{sk}}{dt} = Q_{cr\text{-}sk} - (Q_{sk\text{-}cl} + Q_{evap,sk\text{-}cl}) \quad (۳۴)$$

$$\frac{m_{cl}c_{p,cl}}{A_D f_{cl}}\frac{dT_{cl}}{dt} = Q_{sk\text{-}cl} + Q_{evap,sk\text{-}cl} - (Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{evap,cl\text{-}env}) \quad (۳۵)$$

پیش‌بینی مقدار انتقال حرارت و جرم گذرا در لباس بر اساس معادله (۳۵) برای نخستین بار توسط والکر و همکاران[۳] ارائه شده و تاکنون با معادلات مربوط به موازنه حرارتی بدن جفت نشده است. بنابراین، با جفت کردن چنین معادله‌ای با معادلات موازنه حرارتی ارائه شده توسط گایج می‌توان اثرات انتقال حرارت گذرا و جرم شبه گذرا در لباس را به مدل گایج افزود. به این ترتیب در معادله (۳۵) دمای لباس با در نظر گرفتن موازنه حرارتی لباس با پوست و محیط اطراف قابل محاسبه می‌شود که خود مستلزم تخمین مقدار انتقال حرارت تبخیری بین پوست و لباس از یک سو و انتقال حرارت تبخیری بین لباس و محیط اطراف از سوی دیگر است. لازم به ذکر است که از مساوی قرار دادن این شارهای تبخیری همان معادله (۲۸) حاصل می‌شود؛ به عبارت دیگر، در معادله (۲۸) انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست به لباس دقیقاً برابر با انتقال حرارت تبخیری از لباس به محیط اطراف در نظر گرفته شده است؛ به طوری که اثرات مربوط به آن‌ها در سمت راست این معادله حذف و خنثی شده است. به این ترتیب، در معادله (۳۴) نیز به جای در نظر گرفتن اثرات مربوط به انتقال حرارت تبخیری بین بدن و محیط اطراف (Q_{evap})، انتقال حرارت تبخیری بین پوست و لباس ($Q_{evap,sk\text{-}cl}$) لحاظ شده است. چنین رویکردی در تخمین احساس حرارتی افراد بیانگر این حقیقت است که انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست نه تنها به موازنه حرارتی در داخل بدن بستگی دارد، بلکه به فشار جزئی بخار در لباس نیز وابستگی پیدا می‌کند؛ چرا که مقدار رطوبت ذخیره شده در لباس، سازوکار تبخیر از سطح پوست را محدود می‌سازد. بنابراین در صورتی که فشار جزئی بخار در لباس مشخص باشد، می‌توان حداکثر انتقال حرارت تبخیری بین پوست و لباس را به صورت رابطه (۳۶) تعیین نمود[۳]:

$$Q_{evap,max,sk\text{-}cl} = h_{evap}(P_{sat,sk} - P_{cl}) \quad (۳۶)$$

که در آن h_{evap} ضریب انتقال حرارت تبخیری است (W/m^2kPa) و از رابطه (۳۷) برآورد می‌شود[۳]:

$$h_{evap} = \frac{LR \times i_m}{R_{cl}} \quad (۳۷)$$

در رابطه بالا، پارامتر LR نسبت لوئیس[2] نامیده می‌شود که معمولاً (K/kPa) ۱۶/۵ در نظر گرفته می‌شود[۱۶]. همچنین i_m بازدهی کلی نفوذ بخار[3] در لباس است که معیاری از قابلیت لباس در جذب رطوبت از محیط اطراف و یا از سطح پوست زیر آن است[۲۰،۱۶].

1- Reduction Factor

2- Lewis Ratio

3- Total Vapor Permeation Efficiency

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

جدول ۱ بازدهی کلی نفوذ بخار برای لباس‌های مختلف[۳].

نوع لباس	بازدهی کلی نفوذ بخار
کت رسمی مردانه	۰/۳۷
لباس غیررسمی تابستانه‌ی مردانه	۰/۴۳
پیراهن و جین	۰/۴۰
پوشش محافظ لباس	۰/۳۹

این پارامتر برای لباس‌هایی با جنس و بافت‌های مختلف دارای مقادیر متفاوتی است[۱۹]. جدول ۱ مقدار i_m را برای برخی از لباس‌ها نشان می‌دهد؛ معمولاً مقدار متوسط ۰/۴ برای بسیاری از لباس‌ها در نظر گرفته می‌شود[۳].

مقدار انتقال حرارت تبخیری بین پوست و لباس ($Q_{evap,sk-cl}$) نیز به صورت رابطه (۳۸) محاسبه می‌شود[۳]:

$$Q_{evap,sk-cl} = 0.06\, Q_{evap,max,sk-cl} + 0.94\, Q_{evap} \quad (۳۸)$$

این رابطه نشان می‌دهد که در حضور لباس، شار حرارتی تبخیری بین پوست و لباس هم متأثر از موازنه حرارتی سیستم فیزیولوژیک بدن است (که مقدار Q_{evap} از آن برآورد می‌شود) و هم تحت تأثیر رطوبت نسبی لباس و در نتیجه فشار جزئی بخار در لباس قرار دارد. بنابراین با استفاده از روابط (۶) و (۳۶) می‌توان به ترتیب مقادیر Q_{evap} و $Q_{evap,max,sk-cl}$ را برآورد نمود و در نهایت شار حرارتی تبخیری بین پوست و لایه لباس را تعیین کرد. لازم به ذکر است که در این سازوکار مقدار تری پوست (w) با آنچه که از روابط (۲۲) بدست می‌آید متفاوت است که با بازنویسی مجدد رابطه (۳۸) قابل محاسبه می‌شود:

$$wQ_{evap,max,sk-cl} = 0.06\, Q_{evap,max,sk-cl} + 0.94\, wQ_{evap,max} \quad (۳۹)$$

و یا می‌توان نوشت:

$$w = \frac{0.06\, Q_{evap,max,sk-cl}}{Q_{evap,max,sk-cl} - 0.94\, Q_{evap,max}} \quad (۴۰)$$

همچنین تعیین نرخ رطوبت جذب شده بر واحد سطح لباس از طریق رابطه (۴۱)محاسبه می‌شود[۳]:

$$\dot{m}_{sweating} = \frac{Q_{evap,sk-cl}}{h_{fg}} \quad (۴۱)$$

با تغییر در میزان رطوبت جذب شده در لباس، ظرفیت گرمایی آن نیز دستخوش تغییر می‌شود[۳] و به صورت رابطه (۴۲) اصلاح می‌شود:

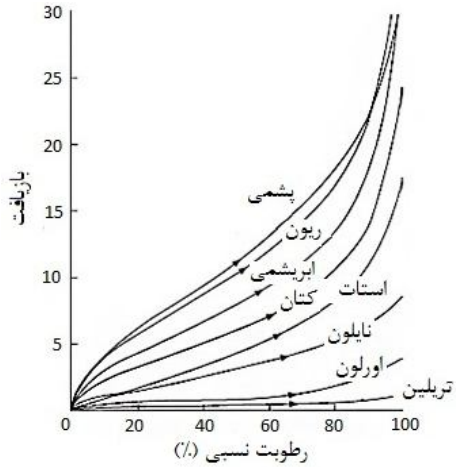
$$C_{cl} = (m_{cl} \cdot c_{p,cl}) + (\dot{m}_{sweating} \cdot c_{p,water})(\Delta t \cdot A_D) \quad (۴۲)$$

به این ترتیب، فشار جزئی بخار در لباس (P_{cl}) تنها متغیر مجهولی است که با تعیین آن می‌توان روند ذکر شده را کامل نمود. برای تعیین فشار جزئی بخار در لباس می‌توان از پارامتری به نام بازیافت[1] استفاده کرد. بازیافت به صورت نسبت جرم رطوبت جذب شده در لباس به جرم لباس خشک تعریف می‌شود[۲۱] و با تعریف ارائه شده در رابطه (۴۳) قابل بیان است:

$$\text{Regain} = \frac{\dot{m}_{sweating}}{m_{cl}} \cdot \Delta t \cdot A_D \quad (۴۳)$$

که در آن Δt معرف زمان سپری شده است که در محاسبات همان گام زمانی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ منحنی تغییرات بازیافت با تغییرات رطوبت نسبی را برای الیاف مختلف نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان فشار جزئی بخار موجود در لباس را تعیین نمود. بر اساس منحنی‌های رسم شده در این شکل، با افزایش رطوبت نسبی لباس، پارامتر بازیافت نیز افزایش می‌یابد. به این ترتیب با استفاده از منحنی‌های شکل ۱ و بر اساس تعریف ارائه شده برای پارامتر بازیافت، می‌توان اثرات مربوط به لباس‌هایی با جنس و جرم‌های مختلف را بر احساس حرارتی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن افراد مشاهده نمود.

1- Regain



شکل ۱ منحنی‌های تغییرات پارامتر بازیافت با تغییر در رطوبت نسبی الیاف مختلف[۲۱].

البته لازم به ذکر است که اگرچه در پارامتر بازیافت اثرات مربوط به ساختار لباس مانند نوع دوخت (ریز بافت یا درشت بافت) و قطر الیاف لحاظ نشده است، اما می‌توان اثر این پارامترها را در بازدهی کلی نفوذ بخار (i_m)، که در معادله (۳۷) آمده است، وارد نمود[۱۹].

علاوه بر موارد یاد شده، می‌توان اثرات مربوط به ضخامت لباس را نیز به صورت غیرمستقیم به ساختار این مدل وارد نمود؛ به این منظور برای مقاومت حرارتی لایه لباس، که بر اساس آنچه که قبلاً ذکر شد به صورت استوانه‌ای هم‌مرکز با دو لایه پوست و مرکز بدن در نظر گرفته می‌شود، می‌توان نوشت:

$$R_{cl} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi l K_{cl}} \quad (۴۴)$$

که r_1 و r_2 به ترتیب معرف شعاع داخلی و خارجی لایه لباس هستند و K_{cl} ضریب انتقال حرارت هدایت آن است. همچنین بر اساس رابطه (۳۷) می‌توان نوشت:

$$R_{cl} = \frac{LR \times i_m}{h_{evap}} \quad (۴۵)$$

به عبارت دیگر:

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \propto \frac{1}{h_{evap}} \quad (۴۶)$$

به این ترتیب با افزایش نسبت r_2/r_1 که به معنی افزایش ضخامت لباس است، ضریب انتقال حرارت تبخیری کاهش می‌یابد که خود بر اساس رابطه (۳۶) منجر به کاهش مقدار $Q_{evap,max,sk-cl}$ می‌شود. کاهش $Q_{evap,max,sk-cl}$ نیز نهایتاً بر اساس روابط (۳۸) و (۴۱) کاهش نرخ رطوبت جذب شده در لباس را به دنبال دارد.

بر اساس آنچه که ذکر شد و به منظور تعیین لحظه به لحظه فشار جزئی بخار در لباس، شرایط ترمودینامیکی لباس در ابتدا به صورت اشباع و فشار جزئی بخار در آن برابر با فشار جزئی بخار در محیط اطراف در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روابط (۳۸) و (۴۱) نرخ رطوبت جذب شده در لباس و انتقال حرارت تبخیری از سطح پوست به لباس را می‌توان تعیین نمود. با در اختیار داشتن نرخ رطوبت جذب شده در لباس می‌توان بازیافت را تعیین و با توجه به جنس لباس، رطوبت نسبی آن را مشخص نمود. این رطوبت نسبی، فشار جزئی بخار جدیدی را معین می‌کند که به نقطه آغاز محاسبات بازگردانده می‌شود. این حلقه تا زمانی که اختلاف بین فشارهای به

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

دست آمده در دو مرحله آخر به سمت صفر میل کند ادامه می‌یابد. در نهایت و با مشخص شدن P_{cl} مقدار انتقال حرارت تبخیری از لباس به محیط اطراف برآورد می‌شود[۳]:

$$Q_{evap,cl\text{-}env} = h_{evap}(P_{cl} - P_a) \quad (۴۷)$$

به این ترتیب با بدست آمدن مقدار $Q_{evap,cl\text{-}env}$، کلیه مجهولات مربوط به معادلات دیفرانسیل (۳۳)، (۳۴) و (۳۵) معین می‌شوند که از طریق گسسته-سازی آن‌ها می‌توان مقادیر T_{cr}، T_{sk} و T_{cl} را تعیین نمود.

۳- نتایج و بحث

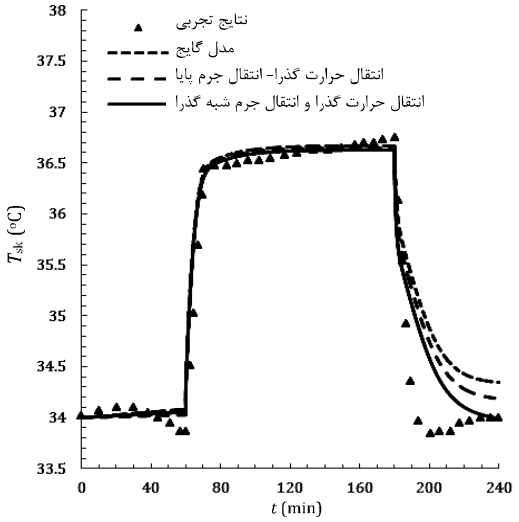
در این بخش به بررسی تأثیر مدل‌سازی‌های یاد شده برای لباس بر بهبود نتایج حاصل از مدل گایج پرداخته می‌شود و نتایج برآمده از اصلاحات انجام گرفته روی مدل گایج با نتایج تجربی مقایسه می‌شوند.

در ابتدا و به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی‌های یاد شده در این مقاله، نتایج حاصل از این مدل‌ها با نتایج تجربی هاردی و استالویج مقایسه شده‌اند[۲۲]. در بخشی از پژوهش تجربی انجام شده توسط هاردی و استالویج که به آزمون مواجهه با گرما موسوم بود، افراد مورد آزمایش ابتدا در محیطی به دمای ۳۰ °C و رطوبت نسبی ۴۰٪ قرار گرفتند. سپس این افراد را پس از سپری شدن ۶۰ دقیقه به محیط دیگری با دمای ۴۸ °C و رطوبت نسبی ۳۰٪ انتقال دادند. نهایتاً و در مرحله پایانی از آزمایش، این افراد را به محیط اولیه بازگرداندند. در این آزمایش‌ها که تحت شرایط کاملاً کنترل شده انجام شده است، در هر مرحله از آزمایش، دمای پوست افراد در بازه‌های زمانی مشخص با استفاده از ابزارهای دقیق ثبت و گزارش شده است. شکل ۲ دمای پوست اندازه‌گیری شده در این پژوهش تجربی را در کنار نتایج برآمده از حل عددی معادلات دیفرانسیل مربوط به مدل‌سازی‌های یاد شده در این مقاله نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در مراحل اول و دوم آزمایش، دمای پوست پیش‌بینی شده توسط هر سه مدل تقریباً یکسان بوده است؛ این در حالی است که در مرحله سوم و در انتقال افراد از محیط گرم به محیط سرد، مدل‌های مورد مطالعه نتایج متفاوتی را ارائه داده‌اند. بر اساس این منحنی‌ها، شیب تغییرات دمای پوست در نخستین دقایق ورود افراد به محیط سرد بسیار تند بوده است و به تدریج این شیب کند شده و دمای پوست به حالت پایا می‌رسد. همچنین مشاهده می‌شود که در مرحله سوم آزمایش، مدل گایج دمای پوست را بالاتر از سایر مدل‌ها تخمین زده است و این در حالی است که در نظر گرفتن اثرات مربوط به اینرسی حرارتی و جرمی لباس توانسته است به بهبود نتایج کمک کند.

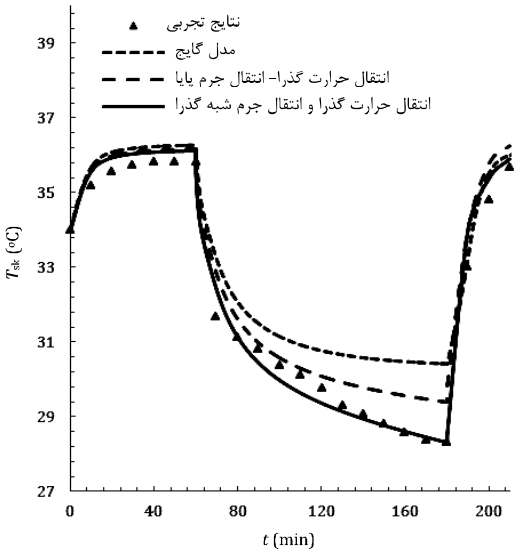
هاردی و استالویج در بخش دیگری از پژوهش خود، که به آزمون مواجهه با سرما موسوم بود، افراد مورد آزمایش را تحت شرایط کاملاً کنترل شده ابتدا در اتاقکی با دمای ۴۳ °C و رطوبت نسبی ۳۰٪ قرار دادند و پس از ۶۰ دقیقه آن‌ها را به اتاقک دیگری با دمای ۱۷ °C و رطوبت نسبی ۴۰٪ انتقال دادند. نهایتاً و در آخرین مرحله از آزمایش، این افراد را به محیط اولیه بازگرداندند[۲۲]. نتایج این آزمون نشان داده است که احساس حرارتی افراد از چنین انتقال‌هایی ورود به محیط سرد از محیط گرم و سپس از محیط سرد به محیط گرم بوده است.

شکل ۳ دمای پوست اندازه‌گیری شده در آزمون مواجهه با سرما را در کنار نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌های یاد شده در بخش قبل نشان می‌دهد.

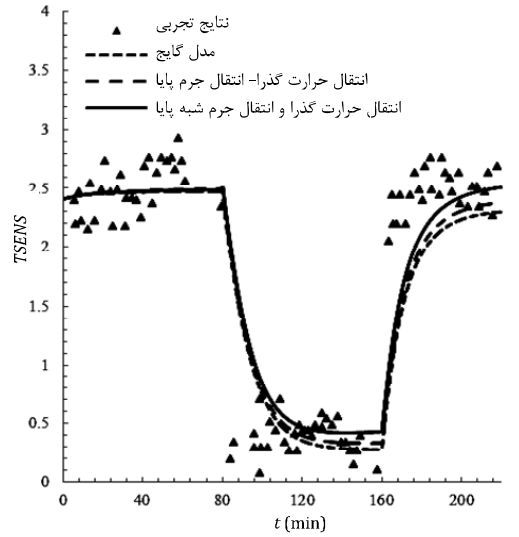
در مرحله اول آزمایش، با توجه به بالاتر بودن دمای هوای محیط از دمای حالت خنثی پوست، ابتدا دمای پوست بالا رفته است و سپس با انتقال افراد مورد مطالعه به محیط سرد، دمای پوست آن‌ها نیز کاهش یافته است.



شکل ۲ مقایسه دمای پوست اندازه‌گیری شده در آزمون مواجهه با گرما[۲۲] با دمای پوست محاسبه شده از مدل‌سازی‌های این مقاله.



شکل ۳ مقایسه دمای پوست اندازه‌گیری شده در آزمون مواجهه با سرما[۲۲] با دمای پوست محاسبه شده از مدل‌سازی‌های این مقاله.



شکل ۴ مقایسه نتایج تجربی بدست آمده برای TSENS [۲۳] با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های این مقاله.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

اختلاف در نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌سازی‌های ارائه شده در این مقاله، در این مرحله قابل‌توجه شده است به طوری که مدل گایج نتوانست در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه نتایجی منطبق بر نتایج تجربی ارائه نماید؛ این در حالی است که مدل‌سازی گذرای انتقال حرارت و شبه گذرای رطوبت در لباس نتایجی قابل‌قبول داشته است.

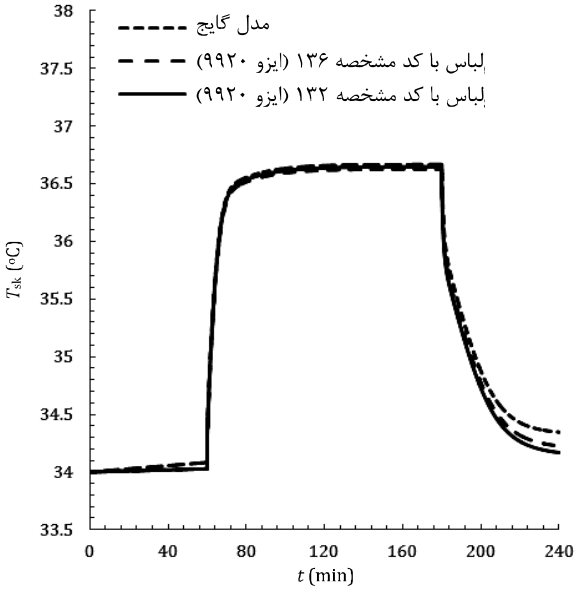
همان گونه که از شکل‌های ۲ و ۳ برداشت می‌شود، مدل‌سازی همزمان انتقال حرارت و انتقال جرم از لباس به صورت گذرا و شبه گذرا در مقایسه با سایر مدل‌سازی‌ها، نتایج بهتری را ارائه داده است. این بهبود در نتایج به ویژه در انتقال افراد از محیط گرم به محیط سرد قابل تأمل‌تر است به طوری که شیب تغییرات نتایج به دست آمده از سه مدل‌سازی در ورود افراد به محیط سرد دارای اختلاف بیشتری هستند.

بهبود در نتایج را می‌توان در پیش‌بینی شاخص *TSENS* نیز مشاهده نمود. به عنوان نمونه، شرایط اعمال شده در پژوهش تجربی آرنس و همکاران[۲۳] شبیه‌سازی شده است که نتایج مربوط به آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

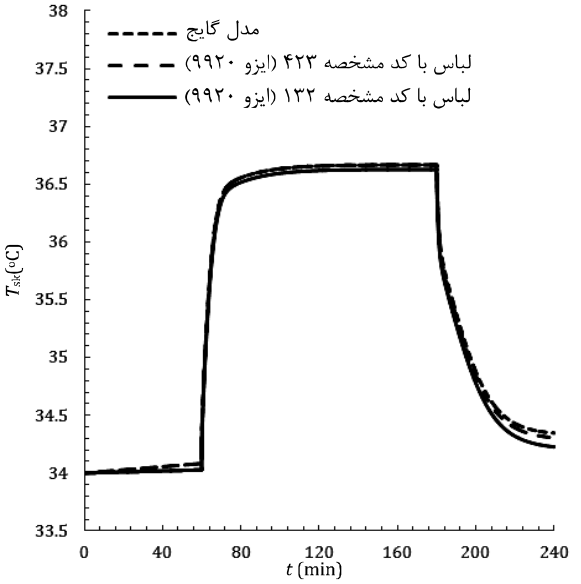
در این آزمایش‌ها، افراد مورد مطالعه را ابتدا در محیطی با دمای $^{\circ}$C ۳۴/۳ قرار دادند و پس از سپری شدن مدت زمان ۸۰ دقیقه آن‌ها را به محیط دیگری با دمای $^{\circ}$C ۲۶/۴ منتقل کردند؛ در مرحله آخر نیز افراد را به محیط سومی با دمای $^{\circ}$C ۳۳/۷ انتقال دادند. همان گونه که مشاهده می‌شود، پیش-بینی هر سه مدل از احساس حرارتی افراد در مرحله اول تقریباً یکسان بوده است. این پیش‌بینی در ورود افراد به محیط سرد منحرف شده به طوری که مدل‌سازی گذرای انتقال حرارت و شبه گذرای انتقال رطوبت در لباس نتایج بهتری را ارائه داده است.

به منظور نشان دادن لزوم و اهمیت گذرا در نظر گرفتن سازوکار انتقال انرژی در لباس (بدون در نظر گرفتن اینرسی یا لختی جرمی لباس) بر اساس استاندارد ایزو ۹۹۲۰ لباس‌هایی با مقاومت حرارتی یکسان و معادل با ۰/۱۲۱ $m^2\,^{\circ}C/W$ ولی با جرم‌های مختلف ۷۳۱ و ۹۱۲ گرم (به ترتیب کدهای ۱۳۲ و ۱۳۶ از استاندارد۹۹۲۰) در نظر گرفته شده است[۲۴]. لباس‌های در نظر گرفته شده از جنس کتان و با گرمای ویژه ۱۳۰۰ J/kg.K هستند. همچنین به منظور اعمال شرایط حرارتی محیطی، از شرایط حرارتی حاکم بر آزمون مواجهه با گرما استفاده شده است (شکل ۵). در این شکل دمای پوست محاسبه شده با سازوکار انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا در دو نوع لباس یاد شده در بالا در کنار نتایج مدل‌سازی گایج ارائه شده است. همان طور که دیده می‌شود اگرچه مقاومت حرارتی هر دو لباس یکسان بوده است، اما با توجه به تفاوت جرم آن‌ها، مقدار دمای پوست برای این حالت‌ها متفاوت پیش‌بینی شده است. در مرحله سوم، شیب تغییرات دمای پوست پیش‌بینی شده برای لباسی که ظرفیت گرمایی پایین‌تری داشته، بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، با افزایش ظرفیت گرمایی لباس، دمای سطح پوست نیز افزایش یافته است. با افزایش ظرفیت گرمایی لباس مقدار حرارت لازم برای افزایش دمای آن به اندازه‌ی ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که این خود به معنی کاهش فرآیند دفع حرارت از لباس به محیط اطراف است. کاهش فرآیند دفع حرارت از لباس نیز منجر به بالاتر رفتن دمای پوست می‌شود.

اختلاف نسبتاً کم بین مقادیر پیش‌بینی شده برای دمای پوست، به دلیل تفاوت ناچیز در جرم لباس‌های انتخابی است و در صورت افزایش اختلاف بین جرم لباس‌ها، می‌توان انتظار دمای پوست‌های با اختلاف بیشتری را نیز داشت.



شکل ۵ مقایسه دمای پوست محاسبه شده از مدل‌سازی گایج با نتایج حاصل از مدل‌سازی انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا برای دو لباس با مقاومت حرارتی یکسان و ظرفیت گرمایی متفاوت.



شکل ۶ مقایسه دمای پوست محاسبه شده از مدل‌سازی گایج با نتایج حاصل از مدل‌سازی انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا برای دو لباس با مقاومت حرارتی برابر و ظرفیت گرمایی متفاوت

به عبارت دیگر، از آنجایی که سازوکار انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا متأثر از ظرفیت گرمایی لباس است، اختلاف بیشتر در ظرفیت گرمایی لباس‌های مورد مطالعه منجر به اثرات محسوس‌تری خواهد شد.

اختلاف نسبتاً کم بین مقادیر پیش‌بینی شده برای دمای پوست، به دلیل تفاوت ناچیز در جرم لباس‌های انتخابی است و در صورت افزایش اختلاف بین جرم لباس‌ها، می‌توان انتظار دمای پوست‌های با اختلاف بیشتری را نیز داشت. به عبارت دیگر، از آنجایی که سازوکار انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم پایا متأثر از ظرفیت گرمایی لباس است، اختلاف بیشتر در ظرفیت گرمایی لباس‌های مورد مطالعه منجر به اثرات محسوس‌تری خواهد شد. در شکل ۶ مقایسه بین دمای پوست پیش‌بینی شده برای لباس کاری با جرم ۱۷۰۸ گرم و مقاومت حرارتی ۰/۱۲۲ $m^2\,^{\circ}C/W$ و لباس روزانه‌ای با جرم ۷۳۱ گرم و

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

مقاومت حرارتی ۰/۱۲۱ $m^2{}^\circ C/W$ ارائه شده است (به ترتیب کدهای ۴۲۳ و ۱۳۲ از استاندارد ایزو ۹۹۲۰).

به این ترتیب مقاومت حرارتی هر دو لباس تقریباً یکسان اما جرم آن‌ها دارای اختلاف قابل‌ملاحظه‌تری نسبت به مقایسه حالت قبل است که منجر به ایجاد اختلاف قابل‌توجه‌تری در دمای پوست پیش‌بینی شده برای هر دو لباس شده است.

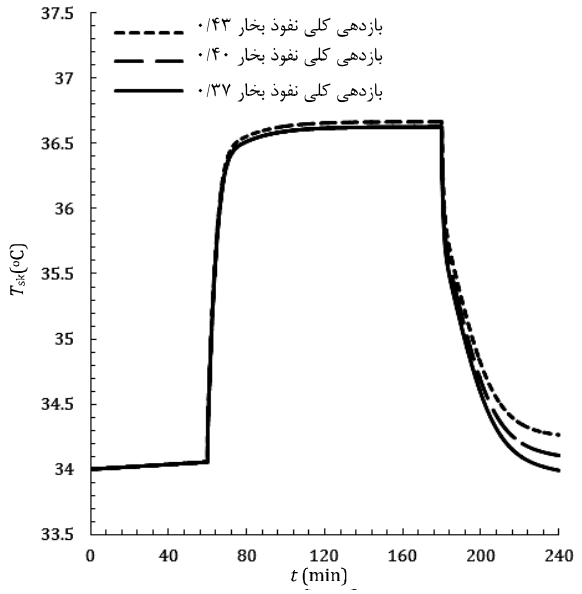
به منظور مشاهده اثرات مربوط به تغییر در بازدهی کلی نفوذ بخار، پاسخ حرارتی سیستم فیزیولوژیک بدن به لباس‌هایی با i_m های مختلف نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۷ نتایج برآمده از اعمال شرایط حرارتی مشابه با حالت قبل (آزمون مواجهه با گرما) و با سازوکار انتقال انرژی گذرا-انتقال جرم شبه گذرا در لباس ارائه شده است که در آن از لباس‌هایی با مقاومت حرارتی ۰/۱۲۱ $m^2{}^\circ C/W$، جرم ۷۳۱ گرم و گرمای ویژه ۱۳۰۰ J/kg.K استفاده شد. بازدهی کلی نفوذ بخار نیز به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۴۰ و ۰/۴۳ در نظر گرفته شده است.

بر اساس منحنی‌های این شکل، با افزایش بازدهی کلی نفوذ بخار در لباس، ضریب انتقال حرارت تبخیری افزایش می‌یابد که منجر به افزایش در مقدار حداکثر انتقال حرارت تبخیری بین پوست و لباس ($Q_{evap,max,sk\text{-}cl}$) می‌شود. به این ترتیب میزان رطوبت جذب شده در لباس نیز افزایش می‌یابد و این رطوبت انباشته در لباس، فشار جزئی بخار در لباس (P_{cl}) را افزایش داده و مانع از تبخیر هر چه بیشتر رطوبت از سطح پوست می‌شود. در نهایت، کاهش روند دفع حرارت از طریق سازوکار نفوذ و پخش رطوبت پوست، دمای آن را افزایش می‌دهد. علاوه بر این روند، می‌توان گفت با افزایش بازدهی کلی نفوذ بخار، قابلیت جذب رطوبت لباس نیز بالا می‌رود و این افزایش رطوبت مطابق رابطه (۴۲) باعث افزایش ظرفیت گرمایی آن نیز می‌شود. افزایش ظرفیت گرمایی لباس نیز نهایتاً بر اساس آنچه که در مورد نمودارهای شکل ۵ و ۶ بیان شد، افزایش دمای پوست را به دنبال خواهد داشت.

یادآور می‌شود که بر اساس روند مشاهده شده در تمام نمودارهای ارائه شده در این مقاله، اثرات مربوط به تغییر در بازدهی کلی نفوذ بخار نیز در بازگشت افراد از محیط گرم به محیط سرد (مرحله سوم) مشهودتر بوده است.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر انتقال حرارت گذرا و انتقال رطوبت شبه گذرا از لباس در تخمین احساس حرارتی و پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن افراد پرداخته شد. بر اساس مدل آسایش حرارتی گایج نقش لباس در پیش‌بینی احساس حرارتی افراد محدود به مقاومت حرارتی آن می‌شود به طوری که سازوکارهای انتقال انرژی و رطوبت از لباس را به صورت پایا در نظر می‌گیرد. در ابتدا معادله گذرای انتقال انرژی از لباس به معادلات دیفرانسیل مدل گایج جفت و مشاهده شد که با چنین رویکردی، پیش‌بینی دقیق‌تری از احساس حرارتی افراد بدست می‌آید. نتایج بهبود یافته حاکی از این واقعیت هستند که علاوه بر مقاومت حرارتی لباس، ظرفیت گرمایی لباس نیز نقشی تعیین کننده دارد و عدم چشم‌پوشی از آن می‌تواند پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه نماید. سپس اثرات مربوط به سازوکار شبه گذرای انتقال جرم در لباس نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و با دیدگاه استفاده از پارامتر بازیافت، انتقال رطوبت در لباس به صورت شبه گذرا شبیه‌سازی شد. در این مورد نیز مشخص شد که در نظر گرفتن همزمان سازوکارهای انتقال انرژی گذرا و انتقال جرم شبه‌گذرا در لباس می‌تواند به انطباق هر چه بیشتر نتایج برآمده از مدل‌سازی گایج کمک کند. به این ترتیب می‌توان گفت که در مدل‌سازی لباس، بازدهی کلی نفوذ بخار (i_m) نیز دارای اهمیت است؛ چرا که این پارامتر نقشی تعیین کننده در قابلیت جذب رطوبت در لباس دارد.



شکل ۷ مقایسه دمای پوست محاسبه شده از مدل‌سازی انتقال انرژی گذرا- انتقال جرم گذرا برای لباس‌هایی با بازدهی کلی نفوذ بخار متفاوت.

لازم به ذکر است که در مقایسه با مدل گایج، مدل‌سازی سازوکارهای انتقال حرارت و جرم در لباس، به خصوص در انتقال افراد از محیط گرم به سرد توانسته است نتایج قابل قبول‌تری ارائه دهد و این در حالی است که هر دو مدل ارائه شده برای لباس، در ناحیه‌ای که افراد مورد مطالعه از محیط سرد به محیط گرم منتقل شده‌اند (مرحله پایانی آزمون مواجهه با سرما و مرحله دوم آزمون مواجهه با گرما) نتایج تقریباً مشابهی ارائه داده‌اند.

یادآور می‌شود اگرچه در پارامتر بازیافت، اثرات جنس لباس دیده شده است، اما این کمیت دیگر پارامترهای ساختاری لباس مانند نوع دوخت و قطر الیاف آن را لحاظ نمی‌کند که البته این اثرات را بر اساس آنچه که ذکر شد می‌توان در پارامتر بازدهی کلی نفوذ بخار دید.

به طور کلی می‌توان گفت که با اصلاحیه اخیر در مدل گایج، در عین حفظ سادگی مدل، می‌توان اثرات لباس بر احساس حرارتی افراد و پاسخ‌های فیزیولوژیکی بدن را تا حدودی بهبود بخشید. این بهبود اگرچه در انتقال افراد از محیط سرد به گرم چندان محسوس نیست، اما در شرایط انتقال از محیط گرم به محیط سرد به خوبی توانسته است منجر به بهبود نتایج شود.

۴- فهرست علائم

A_D	مساحت سطح بدون لباس بدن (m^2)
$C_{p,b}$	گرمای ویژه بدن ($J/kg\,^\circ C$)
$C_{p,cl}$	گرمای ویژه لباس ($J/kg\,^\circ C$)
$C_{p,water}$	گرمای ویژه آب ($J/kg\,^\circ C$)
h_{fg}	گرمای تبخیر آب (J/kg)
l	قد (m)
m_b	جرم بدن (kg)
m_{cl}	جرم لباس (kg)
M	نرخ متابولیک (W/m^2)
P_{cl}	فشار بخار در لباس (kPa)
Q	نرخ جریان حرارت (W/m^2)
R_{cl}	مقاومت حرارتی لباس ($m^2{}^\circ C/W$)
t	زمان (s)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]

t_a	دمای هوای محیط ($^\circ C$)
w	تری پوست (بی بعد)
W	کار ماهیچه‌ای (W/m^2)

۵- مراجع

[1] A. Gagge, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHRAE Trans.,* Vol. 77, pp. 247-262, 1971.

[2] P. Dongmei, C. Mingyin, D. Shiming, Q. Minglu, A four-node thermoregulation model for predicting the thermal physiological responses of a sleeping person, *Building and Environment,* Vol. 52, pp. 88-97, 2012.

[3] C. Voelker, S. Hoffmann, O. Kornadt, E. Arens, H. Zhang, C. Huizenga, Heat and moisture transfer through clothing, in *The 11th International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland, 2009.

[4] Y. Ogniewicz, C. Tien, Analysis of condensation in porous insulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 24, No. 3, pp. 421-429, 1981.

[5] A. P. Shapiro, S. Motakef, Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results, *International journal of heat and mass transfer,* Vol. 33, No. 1, pp. 163-173, 1990.

[6] A. K. Haghi, Simultaneous moisture and heat transfer in porous system, *Journal of computational and applied mechanics,* Vol. 2, No. 2, pp. 195-204, 2001.

[7] E. Pasdar, M. Maerefat, A. Zolfaghari, Modeling and analysis of heat and mass transfer in clothing as porous media, in *The 1st Conference of Thermal Science*, Mashhad, Iran, 2011. (In Persian)

[8] J. Fan, Z. Luo, Y. Li, Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation, *International journal of heat and mass transfer,* Vol. 43, No. 16, pp. 2989-3000, 2000.

[9] H. Wu, J. Fan, Study of heat and moisture transfer within multi-layer clothing assemblies consisting of different types of battings, *International Journal of Thermal Sciences,* Vol. 47, No. 5, pp. 641-647, 2008.

[10] E. H. Wissler, G. Havenith, A simple theoretical model of heat and moisture transport in multi-layer garments in cool ambient air, *European journal of applied physiology,* Vol. 105, No. 5, pp. 797-808, 2009.

[11] Y. Li, B. Holcombe, Mathematical simulation of heat and moisture transfer in a human-clothing-environment system, *Textile research journal,* Vol. 68, No. 6, pp. 389-397, 1998.

[12] D. Fiala, K. J. Lomas, M. Stohrer, A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system, *Journal of Applied Physiology,* Vol. 87, No. 5, pp. 1957-1972, 1999.

[13] D. Celcar, H. Meinander, J. Geršak, Heat and moisture transmission properties of clothing systems evaluated by using a sweating thermal manikin under different environmental conditions, *International Journal of Clothing Science and Technology,* Vol. 20, No. 4, pp. 240-252, 2008.

[14] 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.

[15] A. P. Gagge, A. Fobelets, L. Berglund, A standard predictive index of human response to the thermal environment, *ASHRAE Trans.;(United States),* Vol. 92, No. CONF-8606125-, 1986.

[16] A. Handbook, Fundamentals, *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers,* Atlanta, 2001.

[17] M. Maerefat, A. Omidvar, *Thermal Comfort, Calculations and Design Considerations*, pp. 36-38, Tehran: Yazda, 2012. (In Persian)

[18] A. Zolfaghari, M. Maerefat, A. Omidvar, Modeling and analysis of body thermal response affected by cold and hot meals, *Iranian Journal of Biomedical Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 2-8, 2010. (In Persian)

[19] N. Özdil, A. Marmaralı, S. D. Kretzschmar, Effect of yarn properties on thermal comfort of knitted fabrics, *International journal of Thermal sciences,* Vol. 46, No. 12, pp. 1318-1322, 2007.

[20] B. Das, A. Das, V. Kothari, R. Fanguiero, M. Araujo, Moisture transmission through textiles, *Part II: evaluation methods and mathematical modeling. Autex Research Journal,* Vol. 7, No. 3, pp. 194-216, 2007.

[21] W. E. Morton, J. W. Hearle, *Physical properties of textile fibres*: Textile institute, 1993.

[22] R. Holopainen, *A human thermal model for improved thermal comfort*: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.

[23] E. Arens, H. Zhang, C. Huizenga, Partial-and whole-body thermal sensation and comfort-Part I: Uniform environmental conditions, *Journal of Thermal Biology,* Vol. 31, No. 1, pp. 53-59, 2006.

[24] I. ISO, 9920: Ergonomics of the thermal environment–Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble, *Geneva: International Standard Organization*, 1995.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.3.8.1]