مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11، ص‌ص 368-376

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



تاثیر به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده در پوشش‌های محافظ آتش‌نشان‌ها بر زمان تاب‌آوری حرارتی

سید علیرضا ذوالفقاری[1*]، محمد فتحیان[2]، محسن طالبی[3]

1- استادیار گروه مهندسی مکانیک و مدیر گروه پژوهشی انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی، دانشگاه بیرجند، بیرجند
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، zolfaghari@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 09 مرداد 1394
پذیرش: 26 مهر 1394
ارائه در سایت: 17 آبان 1394

کلید واژگان:
پوشش‌های محافظ
مواد تغییرفازدهنده
شرایط گرمای سوزان
زمان تاب‌آوری حرارتی

چکیده

در شرایط حرارتی بحرانی، بدن انسان قادر نیست تا از طریق سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت خود را با محیط تطبیق دهد. در چنین شرایطی، یکی از راهکارهای مؤثر در جهت حفاظت از بدن افراد در مقابل آسیب‌های حرارتی، استفاده از پوشش‌های محافظ است. بر این اساس، در تحقیق حاضر تاثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد پوشش‌های محافظ آتش‌نشانان تحت شرایط بحرانی گرمای سوزان به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نوآوری اصلی این تحقیق، مدلسازی همزمان یک پوشش محافظ حاوی مواد تغییرفازدهنده به همراه سازوکارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن انسان می‌باشد. برای این منظور، یک پوشش محافظ چند لایه شامل یک لایه ماده تغییرفازدهنده در نظر گرفته شده و عملکرد حرارتی آن تحت شرایط گرمای سوزان به ازای سه آرایش مختلف برای چینش لایه‌های لباس بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین موقعیت برای قرارگیری مواد تغییر فازدهنده در پوشش‌های محافظ، لایه میانی لباس است. همچنین، بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده مذکور، دمایی حدود 40 درجه سلسیوس می‌باشد. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن است که استفاده از مواد تغییرفازدهنده در پوشش‌های محافظ می‌تواند زمان تاب آوری حرارتی افراد تحت شرایط گرمای سوزان را از حدود 300 ثانیه (برای لباس محافظ فاقد ماده تغییر فاز دهنده) تا حدود 900 ثانیه افزایش دهد.

Effect of using phase change materials in firefighters' protective clothing on the thermal tolerating time

Alireza Zolfaghari[*], Mohammad Fathian, Mohsen Talebi

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
* P.O.B. 97175/376, Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 July 2015
Accepted 18 October 2015
Available Online 08 November 2015

Keywords:
Protective clothing
phase change materials
scorching conditions
thermal tolerating time

ABSTRACT

Under the critical thermal conditions, the human body cannot adapt itself to the environment using physiological thermoregulatory mechanisms. Under these conditions, using protective clothing is one of the effective ways to protect the human body against the thermal injuries. Therefore, in the present study, the effect of using Phase Change Materials (PCMs) on the performance of firefighters' protective clothing has been numerically investigated under the critical scorching conditions. The main contribution of this study is the simultaneous modeling of PCM based protective clothing with physical and physiological mechanisms of the human body. For this purpose, multi-layer protective clothing with a PCM layer has been considered and its thermal performance has been investigated under scorching conditions for three different arrangements of the layers. The results show that the middle layer of protective clothing is the best position for implementing the PCM. Also, the best melting temperature for the mentioned PCM is about 40˚C. Moreover, the results indicate that using the PCMs in protective clothing can increase the thermal tolerating time from 300 seconds (for non-PCM protective clothing) up to 900 seconds under the scorching conditions.

1- مقدمه

ایجاد محیطی سالم و مطبوع توأم با آسایش حرارتی[1] برای افراد، در شرایط محیطی مختلف مساله‌ای مهم به حساب می‌آید. این امر به ویژه در شرایط بحرانی[2] که بدن قادر نیست تا با استفاده از سازوکارهای فیزیولوژیکی، خود را با محیط وفق دهد، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. یکی از این شرایط، شرایط بحرانی گرمای سوزان، مانند شرایط کاری آتش‌نشان‌ها می‌باشد که در آن دمای محیط به حدود 150˚C می‌رسد. در چنین شرایطی، یکی از راه‌کارهای مؤثر برای کاستن از آسیب‌های حرارتی، استفاده از لباس و منسوجات مناسب به عنوان پوشش‌های محافظ است. این پوشش‌ها به دلیل ویژگی‌های خاص خود باید بتوانند افراد را از قرار گرفتن در معرض حرارت و خطرهای احتمالی

1- Thermal comfort
2- Critical condition

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Zolfaghari, M. Fathian, M. Talebi, Effect of using phase change materials in firefighters' protective clothing on the thermal tolerating time, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 368-376, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

ناشی از آن محافظت کنند. از جمله شیوه‌های نوین در زمینه طراحی پوشش‌های محافظ، استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM[1]) در این پوشش‌ها است. موادی که به خاطر ویژگی‌هایی که به لباس می‌دهند، کارآیی آن‌ها را در شرایط بحرانی به طور محسوسی ارتقا می‌دهند. مواد تغییرفازدهنده، دارای توانایی تغییر حالت در یک بازه دمایی معین هستند. این مواد انرژی را در حین فرآیند تغییر فاز از جامد به مایع جذب می‌کنند و هنگام سرد شدن، طی یک فرآیند معکوس تغییر فاز، انرژی جذب شده را به محیط باز می‌گردانند.

در سال‌های اخیر، بحث استفاده از مواد تغییر فاز دهند در منسوجات بیش از پیش مورد توجه محققان و تولیدکنندگان لباس‌های محافظ قرار گرفته است. تاریخچه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لباس و تکنولوژی ترکیب میکروکپسول‌های دارای این مواد در ساختار منسوجات به برنامه‌های تحقیقاتی ناسا[2] در اوایل دهه 1980 برمی‌گردد [1]. هدف اصلی آن سازمان استفاده از این منسوجات در لباس فضانوردان برای بهبود حفاظت حرارتی در برابر نوسان شدید دما در خارج از جو زمین بود. پس از آن در سال 1999، برای اولین بار تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لباس‌های متداول به وسیله محققانی در دانشگاه ایالتی کانزاس به صورت طرح آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت [2]. یک سال بعد پاوز [3] کاربرد مواد تغییرفازدهنده در منسوجات را به منظور بهبود عملکرد حرارتی آنها به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. پس از آن در سال 2004، حمدان و الهینتی [4] بحث آنالیز انتقال حرارت در طی فرآیند ذوب مواد تغییرفازدهنده در لباس‌ها را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در سال 2005، چانگ و لی [5] به بررسی لباس‌های محافظ آتش‌نشان‌ها با سه لایه متفاوت پرداختند. در این مطالعه با ثابت نگه داشتن نوع لایه‌های مجاور، نشان داده شد که در صورت پایین بودن نرخ انتقال بخار آب در لایه وسط، حرارت و عرق تولید شده حاصل از فعالیت، در سیستم لباس باقی مانده و باعث ناراحتی فرد می‌شود. اما در حالتی که نرخ انتقال بخار آب در لایه وسط بیشتر باشد توزیع رطوبت و حرارت نیز چشم‌گیرتر بوده و آسایش حرارتی فرد را به دنبال خواهد داشت. در سال 2008، رینرتسن و همکاران [6] عملکرد مواد تغییرفازدهنده در سیستم لباس‌های شخصی محافظ را مورد بررسی قرار دادند و با توجه به جانمایی مواد تغییر فاز دهنده مورد استفاده، سعی کردند تا به کمینه‌سازی تنش‌های حرارتی و بهبود شرایط آسایش حرارتی و کاهش تعرق بپردازند. در سال 2011 زمبینسکی و همکاران[7] آنالیز مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان یک ابزار مفید در لباس‌های شنا را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در سال 2013، هو و همکاران [8] به مدل‌سازی عایق حرارتی لباس های محافظ آتش‌نشانی به همراه مواد تغییرفازدهنده تعبیه شده در آن پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که با افزایش حجم مواد تغییرفازدهنده، درجه حرارت لایه‌های دیگر پوشش محافظ، کمتر شده و در نتیجه زمان حفاظت از سوختگی برای آتش‌نشان‌ها افزایش می‌یابد. ژو و همکاران [9] در سال 2015 به بررسی افزایش عملکرد حرارتی پوشش‌های محافظ آتش‌نشان‌ها، با در نظر گرفتن مواد تغییرفازدهنده پرداختند. ایشان نشان دادند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده می‌تواند باعث کاهش تنش حرارتی و بهبود اثر حفاظت حرارتی برای آتش‌نشان‌ها باشد.

با توجه به تاریخچه مطالعات صورت گرفته در این زمینه، مشاهده می‌شود که بیشتر تحقیقات از نوع آزمایشگاهی بوده و در آنها اثرات همزمان لباس و سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین در هیچ یک از تحقیقات مذکور، مطالعه جامع درباره تأثیر ترکیب اجزا و بخش‌های مختلف لباس‌های محافظ صورت نپذیرفته و نیز، تعیین زمان تاب‌آوری در محیط‌های بحرانی و همچنین مدل‌سازی گذرا برای احساس حرارتی افراد دارای پوشش‌های محافظ مغفول مانده است. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع آسایش حرارتی، به ویژه در شرایط بحرانی گرمای سوزان، در این تحقیق به بررسی شرایط آسایش حرارتی گذرا و زمان تاب آوری برای آتش‌نشان‌های دارای پوشش‌های محافظ حاوی تغییرفازدهنده پرداخته شده است.

2- فضای نمونه و روند حل مسأله

در تحقیق حاضر، به منظور بررسی اثرات جانمایی ماده تغییرفازدهنده در پوشش‌های محافظ و تأثیر آن بر زمان تاب آوری آتش‌نشان‌ها در برابر شرایط بحرانی، سه آرایش مختلف برای چیدمان لایه‌های مختلف لباس مطابق با شکل 1 در نظر گرفته شده است. همچنین، مشخصات مربوط به لایه‌های این لباس نیز طبق اطلاعات مرجع [10] در جدول 1 ارائه شده است. این مدل-سازی شامل حل همزمان معادلات انتقال حرارت یک بعدی گذرا در لایه‌های لباس با قابلیت قرارگیری عایق‌های گرمایی و مواد تغییر فازدهنده به همراه معادلات مربوط به سازوکارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن انسان، برای تعیین احساس حرارتی افراد زمان تاب‌آوری آتش‌نشان‌ها در شرایط بحرانی گرمای سوزان می‌باشد. در این مطالعه، معادلات حاکم با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن و با رویکرد تفاضل محدود ضمنی صورت گرفته است. همچنین در این مدل‌سازی از مدل آسایش حرارتی گذرای گایج [11] برای پیش بینی احساس حرارتی افراد و شرایط حرارتی بدن استفاده شده است. شرایط مرزی در یک سمت لباس، بر مبنای شرایط حرارتی مربوط به بدن انسان و در سمت دیگر بر مبنای شرایط بحرانی محیط (دمای محیط 150 درجه سلسیوس) در نظر گرفته شده است. دمای اولیه پوشش محافظ 30°C است و سمت بیرونی آن توسط یک پوشش تابشی[3] با ضریب صدور 0.1 از محیط جدا شده است که به دلیل ضخامت کم آن، فقط اثرات آن بر میزان تابش محیط بر لباس در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد ماده تغییرفازدهنده در لباس، از یک PCM با خواص حرارتی متوسط‌گیری شده از میان مواد تغییر فاز دهنده رایج در تحقیقات گذشته [12 و 13] استفاده شده است. ضمن اینکه گرمای نهان ذوب برای ماده تغییر فازدهنده مذکور، 180 kJ/kgK در نظر گرفته شده است.

جدول 1 مشخصات ترموفیزیکی لایه‌های لباس محافظ [10]

Table 1 Thermophysical properties of the protective clothing's layers [10]

نام ماده	چگالی (kg/m^3)	هدایت‌حرارتی (W/mK)	گرمای‌ویژه (J/kg°C)
عایق پلی استایرن	72	0.038	700
ماده تغییر فاز دهنده	1000	0.310	2000
هوای محبوس	1.16	0.026	1

1- Phase Change Materials
2- NASA
3- Radiant shell

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

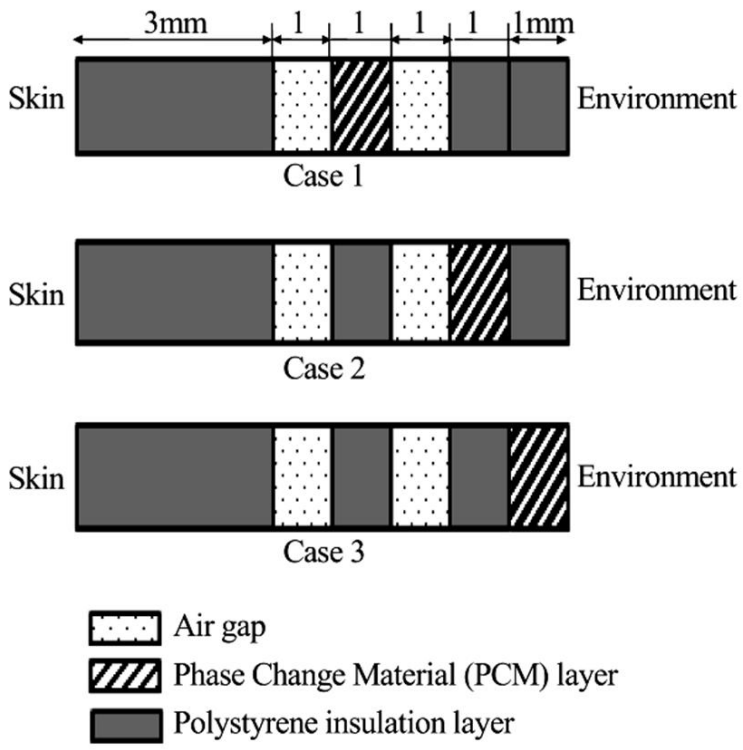


Fig. 1 Three different arrangements for placement of PCM layer in the protective clothing

شکل1 سه آرایش مختلف برای نحوه قرارگیری لایه حاوی ماده تغییر فاز دهنده در لباس محافظ

3-معادلات حاکم

3-1- انتقال حرارت در لباس

با فرض غالب بودن گرادیان دما در جهت ضخامت لباس در مقایسه با سایر جهت‌ها، معادله معادله انتقال حرارت گذرا در لایه‌های مختلف لباس به صورت رابطه (1) قابل ساده‌سازی است:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}_{\mathrm{gen}}}{k} = \frac{\rho}{k}\frac{\partial (C_{\mathrm{p,eff}} T)}{\partial t} \qquad (1)$$

در رابطه (1)، $C_{p,eff}$ بیانگر ظرفیت گرمایی مؤثر برای هر لایه از لباس است. شایان ذکر است که رابطه مذکور هم برای شبیه سازی رفتار لایه‌های جامد و هم لایه‌های تغییر فاز دهنده کاربرد دارد. بر این اساس، مقدار $C_{p,eff}$ برای لایه‌های جامد تقریبا مقداری ثابت دارد. این در حالی است که تعریف $C_{p,eff}$ برای مواد تغییرفازدهنده با پیچیدگی بیشتری مواجه است. لازم به توضیح است که ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده قبل از رسیدن به محدوده دمای ذوب، تقریبا مقداری ثابت دارد. اما پس از رسیدن دمای ماده به محدوده دمای ذوب، ماده شروع به خمیری شدن می‌کند و گرما را به صورت نهان در خود ذخیره می‌کند. این فرآیند را می‌توان به صورت افزایش فرضی ظرفیت گرمایی ماده نیز مورد مدل‌سازی قرار داد. بر این اساس، می‌توان چنین فرض کرد که در هنگام تغییرفاز، ظرفیت گرمایی مؤثر ماده افزایش می‌یابد و قابلیت ماده در ذخیره‌سازی حرارت به طور محسوسی بیشتر می‌شود. تحقیقات پیشین نشان داده است که روند تغییرات ظرفیت گرمایی مؤثر بر حسب دما برای مواد تغییر فاز دهنده به طور چشمگیری شبیه تابع توزیع گوس[1] [14] است. بر این اساس، می‌توان ظرفیت گرمایی مؤثر برای مواد تغییرفازدهنده را به شکل رابطه (2) تعریف نمود [15]:

$$C_{\mathrm{p,eff}} = C_{\mathrm{p_0}} + \frac{L_{\mathrm{f}}}{\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{T-T_{\mathrm{m}}}{\sqrt{2}\beta}\right)^2\right] \qquad (2)$$

که C_{p0} ظرفیت گرمایی ماده تغییر فازدهنده در حالت جامد، L_f گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده و T_m متوسط دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده است. همچنین، β بیانگر انحراف از معیار تابع توزیع نرمال گوس است و در رابطه (2) به بازه دمایی ذوب (محدوده خمیری شدن) ماده تغییرفازدهنده مربوط می‌شود. با بررسی خواص حرارتی مربوط به مواد تغییرفازدهنده متداول در کاربردهای مربوط به منسوجات و پوشش‌های محافظ [16]، محدوده دمایی تغییر فاز ماده از حالت جامد به مایع در حدود 1 درجه سلسیوس برآورد شد و در نتیجه در این شرایط، مقدار پارامتر β، حدود 0.16 می‌باشد. با جای‌گذاری ظرفیت گرمایی اصلاح شده در رابطه (1)، معادله انتقال حرارت یک بعدی برای مواد تغییرفازدهنده به‌دست می‌آید. همچنین، شرایط مرزی در سمت خارجی لباس با در نظر گرفتن سازوکارهای انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش مطابق با رابطه (3) منظور شده است:

$$-k\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{\mathrm{cl,o}} = h_{\mathrm{c}}\left(T_{\mathrm{cl,o}} - T_{\mathrm{air}}\right) + \varepsilon\sigma\left(\left(T_{\mathrm{cl,o}} + 273\right)^4 - \left(T_{\mathrm{mr}} + 273\right)^4\right) \qquad (3)$$

که h_c ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی سطح لباس (W/m^2K)، σ ثابت استفان بولتزمن (5.67×10^{-8} W/m^2K^4)، ε ضریب صدور سطح لباس (بی‌بعد) و دمای متوسط تابشی (°C) می‌باشد. ضمنا در تحقیق حاضر از مقاومت حرارتی میان بدن و لباس صرفنظر شده است و بر این اساس، شرط مرزی سمت داخلی لباس مطابق با رابطه (4) و بر مبنای دمای سطح پوست فرد تعیین می‌شود:

$$T_{\mathrm{cl,i}} = T_{\mathrm{sk}} \qquad (4)$$

که T_{sk} دمای سطح پوست فرد است و با استفاده از معادلات مربوط به موازنه انرژی بدن انسان، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، تعیین می‌شود.

3-2- عوامل فیزیکی مؤثر بر موازنه‌ی انرژی بدن انسان

بدن انسان را می‌توان به منزله‌ی یک موتور حرارتی فرض نمود که در آن انرژی ورودی از طریق سوخت‌وساز غذا و تحت عنوان نرخ متابولیک (M) تولید شده و بخشی از حرارت تولیدی به کار مکانیکی (W) جهت فعالیت اعضای بدن و بخش دیگر آن از طریق تنفس (Q_{res}) و پوست (Q_{sk}) به صورت حرارت غیر قابل مصرف به محیط دفع می‌گردد. همچنین، در صورتی که بدن نتواند همه حرارت غیر قابل مصرف را با محیط تبادل کند، بخش باقیمانده‌ی این انرژی حرارتی در بدن ذخیره (S) می‌شود. بنابراین می‌توان معادله‌ی موازنه‌ی انرژی برای بدن را به صورت رابطه (5) و بر حسب وات بر متر مربع سطح بدن نوشت [17]:

$$M - W = Q_{\mathrm{sk}} + Q_{\mathrm{res}} + S \qquad (5)$$

همچنین، تبادل حرارت از طریق پوست را می‌توان به دو بخش محسوس ($Q_{sens,sk}$) و تبخیری ($Q_{ev,sk}$) تقسیم کرد:

$$Q_{\mathrm{sk}} = Q_{\mathrm{sens,sk}} + Q_{\mathrm{ev,sk}} \qquad (6)$$

از سوی دیگر، انتقال حرارت محسوس از پوست باید از طریق سازوکار هدایت حرارتی در لباس منتشر شود. بنابراین:

$$Q_{\mathrm{sens,sk}} = -k\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{\mathrm{cl,i}} \qquad (7)$$

که در آن k رسانش گرمایی برای لایه‌ای از لباس است که در تماس با بدن می‌باشد. همچنین، میزان انتقال حرارت ناشی از تبخیر از سطح پوست از رابطه (8) قابل محاسبه است [18]:

$$Q_{\mathrm{ev,sk}} = w\left(\frac{P_{\mathrm{sk,sat}} - P_{\mathrm{air}}}{R_{\mathrm{et}}}\right) \qquad (8)$$

با توجه به این‌که، سازوکار تعرق موجب می‌شود که بخشی از سطح پوست همواره خیس باشد، w تری پوست[2] (بی‌بعد) است و به صورت کسری از سطح

1- Gauss

2- Skin wettedness

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

پوست بدن که از آب پوشیده شده است، تعریف می‌گردد. همچنین، $P_{sk,sat}$ فشار بخار اشباع بر سطح پوست (kPa)، P_{air} فشار بخار هوا (kPa) و R_{et} میزان مقاومت تبخیری لباس (m^2kPa/W) می‌باشد. شایان ذکر است که مقاومت حرارتی لباس به میزان تراوایی لایه‌های لباس و نفوذپذیری جرمی آن وابسته است. اما توجه به این نکته ضروری است که در شرایط بحرانی، زمان تاب آوری حرارتی آتش‌نشانان بسیار کوتاه و در حدود چند دقیقه است؛ لذا در این زمان کوتاه، امکان نفوذ جرمی تعرق به همه لایه‌های لباس وجود ندارد و در نتیجه، تنها لایه‌هایی از لباس که در مجاورت سطح بدن قرار دارند و دارای مقاومت تبخیری کمتری هستند می‌توانند بر نرخ انتقال حرارت تبخیری از سطح بدن اثرگذار باشند. به بیان دیگر، در این زمان کوتاه، نفوذ جرمی تعرق به اندازه‌ای نیست که بتواند تا محل قرارگیری لایه ماده تغییرفازدهنده نفوذ کند و لذا تعرق این فرصت را پیدا نمی‌کند که بیش از لایه 3 میلی‌متری لباس که میان بدن و اولین لایه هوا قرار گرفته است، نفوذ نماید. در نتیجه می‌توان گفت که در شرایط تحقیق حاضر، مقاومت تبخیری مربوط به لایه ماده تغییرفازدهنده تأثیری بر عملکرد حرارتی لباس در زمان کوتاه نخواهد داشت. بر این اساس در تحقیق حاضر، مقاومت تبخیری لباس برای لایه 3 میلی‌متری مجاور سطح بدن و مقدار فشار بخار هوا (P_{air}) برمبنای شرایط اولین لایه هوا در لباس در نظر گرفته شده است.

ضمن اینکه اتلافات حرارتی ناشی از تنفس را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (9) محاسبه نمود [18]:

$$Q_{res} = 0.0014M(34-T_{air})+0.0173M(5.87-P_{air}) \quad (9)$$

3-3- عوامل فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن

به منظور کنترل مقدار اتلافات حرارتی، بدن انسان از یک سری سازوکارهای فیزیولوژیکی استفاده می‌کند که اصطلاحا به آن‌ها، سازوکارهای تنظیم حرارت بدن گفته می‌شود. این سازوکارها که از طریق سیگنال‌های فرستاده شده توسط حسگرهای دمایی بدن عمل می‌کنند، عبارتند از: تعرق تنظیمی، افزایش متابولیک ناشی از لرز، اتساع و انقباض رگ‌ها. شایان ذکر است که قدرت سیگنال‌های حرارتی بدن به میزان اختلاف دمای پوست یا مرکز با دمای حالت خنثی برای این بخشها بستگی دارد. بر این اساس سیگنال‌های حرارتی برای بخش‌های مرکزی و پوست به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$WSIG_{sk} = \max\{0, T_{sk} - T_{sk,n}\} \quad (10)$$

$$WSIG_{cr} = \max\{0, T_{cr} - T_{cr,n}\} \quad (11)$$

که $WSIG_{sk}$ و $WSIG_{cr}$ به ترتیب بیانگر سیگنال‌های گرمایی مربوط به بخش پوست و بخش مرکزی بدن هستند. همچنین، دمای حالت خنثی برای پوست ($T_{sk,n}$) و مرکز بدن ($T_{cr,n}$) به ترتیب عبارتند از:

$$T_{sk,n} = 33.7^{\circ}C \quad (12)$$

$$T_{cr,n} = 36.8\ ^{\circ}C \quad (13)$$

همان‌طور که گفته شد، یکی از سازوکارهای تنظیم حرارت بدن اتساع و انقباض رگ‌ها است. این سازوکار باعث می‌شود تا در شرایط گرما، رگ‌ها گشاد شده و خون بیشتری به سمت پوست سرازیر شود و در نتیجه گرمای بخش مرکزی بدن به طور بهتری به محیط دفع شود. همچنین در شرایط سرما، این سازوکار با منقبض کردن رگ‌های جانبی بدن موجب می‌شود که خون کمتری به پوست برسد و حرارت بدن کمتر تلف شود. بر این اساس، سازوکار اتساع و انقباض عروق موجب می‌شود که نرخ شارش خون در بخش پوست تغییر کرده و در نتیجه کسر جرمی بخش پوست متأثر شود. رابطه (14) ارتباط میان کسر جرمی بخش پوست (λ) با دبی جرمی شارش خون ($\dot{m}_{bl}$) را نشان می‌دهد:

$$\lambda = 0.0418 + \frac{0.745}{3600\dot{m}_{bl} + 0.585} \quad (14)$$

که در آن $\dot{m}_{bl}$ دبی جریان خون میان پوست و مرکز بدن (kg/m^2s) بوده و بصورت تابعی از سیگنال‌های حرارتی می‌باشد [18]:

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200\, WSIG_{cr}}{3600(1 + 0.5CSIG_{sk})} \quad (15)$$

یکی دیگر از سازوکارهای فیزیولوژیکی کنترل دمای بدن، تعرق در شرایط گرم است. میزان تری پوست در اثر تعرق تنظیمی (w) از رابطه (16) قابل محاسبه است [18]:

$$w = \min\left\{0.06 + 0.94\left(\frac{R_{et}\dot{m}_{rsw}H_f}{P_{sk,sat}-P_{air}}\right), 1.0\right\} \quad (16)$$

که H_f گرمای نهان تبخیر برای آب است. همچنین، $\dot{m}_{rsw}$ نرخ ترشح عرق بر حسب kg/m^2s می‌باشد و توسط رابطه (17) قابل محاسبه است[18]:

$$\dot{m}_{rsw} = 4.7 \times 10^{-5} WSIG_b \exp\left(\frac{WSIG_{sk}}{10.7}\right) \quad (17)$$

که $WSIG_b$ سیگنال‌های گرمایی مربوط به کل بدن بوده و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$WSIG_b = \max\{0, T_b - T_{b,n}\} \quad (18)$$

$$T_b = \lambda\, T_{sk} + (1-\lambda)\, T_{cr} \quad (19)$$

$$T_{b,n} = \lambda\, T_{sk,n} + (1-\lambda)\, T_{cr,n} \quad (20)$$

4-3- مدل ناپایای گایج

یکی از وجوه تمایز تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین، عدم ثابت بودن شرایط مرزی در مرز داخلی لباس و سمت بدن است. به طوری که در تحقیق حاضر، تعامل پویای میان بدن- لباس- محیط مورد مدل‌سازی قرار می‌گیرد. بر این اساس، شرایط مرزی سمت بدن، برمبنای شرایط فیزیکی و فیزیولوژیکی فرد در طول زمان متغیر است و بسته به این‌که میزان تنش‌های حرارتی وارد بر بدن چه میزان باشد، شرایط بدن می‌تواند تغییر کند. لذا در تحقیق حاضر، از مدل ناپایای گایج[1] به منظور مدل‌سازی شرایط حرارتی بدن به‌صورت پویا و وابسته به زمان استفاده شده است.

در سال 1986، گایج مدل دونقطه‌ای[2] خود را ارائه نمود. مدل وی براساس معادله‌ی موازنه‌ی انرژی بدن در شرایط گذرا (وابسته به زمان) توسعه یافته است. در این مدل، بدن به صورت دو استوانه‌ی هم محور مدل می‌شود که استوانه داخلی نماینده اعضای مرکزی بدن و استوانه خارجی نشانگر پوست بدن می‌باشد. با تلفیق معادلات انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده و معادلات اصلی مدل گایج، معادلات موازنه‌ی انرژی برای پوست و بخش مرکزی بدن به صورت روابط (21) و (22) نوشته می‌شود:

$$\frac{\lambda m_b C_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{sk}}{dt} = Q_{cr,sk} - (Q_{sens,sk} + Q_{ev,sk}) \quad (21)$$

$$\frac{(1-\lambda) m_b C_{p,b}}{A_D}\frac{dT_{cr}}{dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr,sk} \quad (22)$$

که m_b جرم بدن (kg)، $C_{p,b}$ ظرفیت گرمایی بدن (J/kg.K)، T_{cr} دمای مرکز بدن (˚C)، T_{sk} دمای پوست (˚C)، t زمان (s) و λ کسر جرمی پوست است

1- Gagge
2- Two-node

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

[18]. همچنین، $Q_{cr,sk}$ میزان تبادل حرارت میان پوست و مرکز بدن می‌باشد و به وسیله رابطه (23) قابل محاسبه است [18].

$$Q_{cr,sk} = (K_{eff} + C_{p,bl}\dot{m}_{bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (23)$$

که K_{eff} مقدار مؤثر رسانش حرارت میان پوست و مرکز بدن $(W/m^{2}.^{\circ}C)$ و $C_{p,b}$ ظرفیت گرمایی خون $(J/kg.^{\circ}C)$ می‌باشد.

براساس آن‌چه که گفته شد، مدل دونقطه‌ای گایج با استفاده از معادلات موازنه انرژی برای پوست و بخش مرکزی، دمای این بخش‌ها را محاسبه کرده و از این طریق، احساس حرارتی افراد را به کمک یک رابطه‌ی تجربی و بصورت شاخص *TSENS*[1] برآورد می‌کند [18].

$$TSENS=\begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}) & T_b < T_{b,c} \\ 4.7\eta_{ev}\left(\frac{T_b - T_{b,c}}{T_{b,h} - T_{b,c}}\right) & T_{b,c} \le T_b \le T_{b,h} \\ 4.7\eta_{ev} + 0.685(T_b - T_{b,h}) & T_b > T_{b,h} \end{cases} \quad (24)$$

که η_{ev} بازده تبخیری است و استاندارد آسایش حرارتی اشری [19] مقدار تقریبی 0.85 را برای آن پیشنهاد می‌دهد. البته شایان ذکر است که مقدار بازده تبخیری می‌تواند بسته به نوع پوشش افراد تغییر کند. با این حال، به دلیل عدم وجود اطلاعاتی در مورد مقدار بازده تبخیری برای پوشش‌های محافظ، همان مقدار تقریبی 0.85 برای η_{ev} در نظر گرفته شده است. همچنین:

$$T_{b,c} = 0.0033(M-W)+36.30 \quad (25)$$

$$T_{b,h} = 0.0060(M-W)+36.67 \quad (26)$$

شاخص *TSENS* بیانگر احساس حرارتی افراد است و مطابق با مقیاس احساس حرارتی اشری با عددی بین 5- و 5+ نشان داده می‌شود. به طوری که هر عدد صحیح بین این مقادیر، به این صورت به احساس حرارتی افراد مرتبط می‌شود: 5+ گرمای غیر قابل تحمل، 4+ خیلی داغ، 3+ داغ، 2+ گرم، 1+ کمی گرم، 0 خنثی، 1- کمی خنک، 2- خنک، 3- سرد، 4- خیلی سرد، 5- سرمای غیر قابل تحمل.

در نهایت به منظور تشریح روند حل معادلات حاکم، الگوریتم حل عددی در شکل 2 نشان داده شده است.

4- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مراجع [16] و [20] مقایسه شده است. بر این اساس، ابتدا نتایج مدل‌سازی مربوط به ذوب یک ماده تغییرفازدهنده با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو[20] مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل 3 تغییرات دما برحسب زمان در ضخامت 0.008 متری را با گذشت زمان نشان می‌دهد. مقایسه نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو [20] حاکی از آن است که نتایج تحقیق حاضر ضمن منطبق بودن بر روند نمودار تغییرات دما، با متوسط خطای کمتر از 5 درجه سلسیوس نسبت به نتایج حل عددی تیان و ژائو[20] و نیز با متوسط خطای نزدیک به 4 درجه سلسیوس نسبت به نتایج تجربی، از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین، در شکل 4 مقایسه میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج وانگ و همکاران [16] در خصوص عملکرد پوشش‌های محافظ دارای مواد تغییرفازدهنده مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع دمای به دست آمده در لباس با نتایج وانگ و همکاران [16] تطابق بسیار خوبی دارد.

5- نتایج و بحث

در این تحقیق سعی شده است تا با تغییر آرایش قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در لباس تحت شرایط بحرانی گرمای سوزان، بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده متناسب با شرایط دمایی و چیدمان لایه‌های لباس تعیین شود.

لازم به ذکر است که معیار انتخاب دمای ذوب مناسب برای ماده تغییر فاز دهنده، قرارگیری شاخص احساس حرارتی افراد (*TSENS*) در محدوده قابل تحمل برای بدن است. به طوری که پوشش محافظ باید این توانایی را داشته باشد، تا به مدت زمان بیشتری فرد را در محدوده مناسب برای شرایط احساس حرارتی نگه دارد. قابل ذکر است که شاخص احساس حرارتی مطلوب برای فرد، عددی بین 0.5- تا 0.5 و احساس حرارتی مجاز در صورتی که فرد دچار آسیب جسمی نشود عددی بین 3- تا 3 است و خارج از این محدوده یعنی به ازای شاخص احساس حرارتی بالاتر از 3 و پایین‌تر از 3- فرد دچار آسیب حرارتی می‌شود. از آن‌جایی که هدف، افزایش سطح تحمل افراد در شرایط دمایی بحرانی است؛ بنابراین در تحقیق حاضر، عدد 3+ به عنوان حد شاخص احساس حرارتی برای شرایط گرمای سوزان در نظر گرفته شده است.

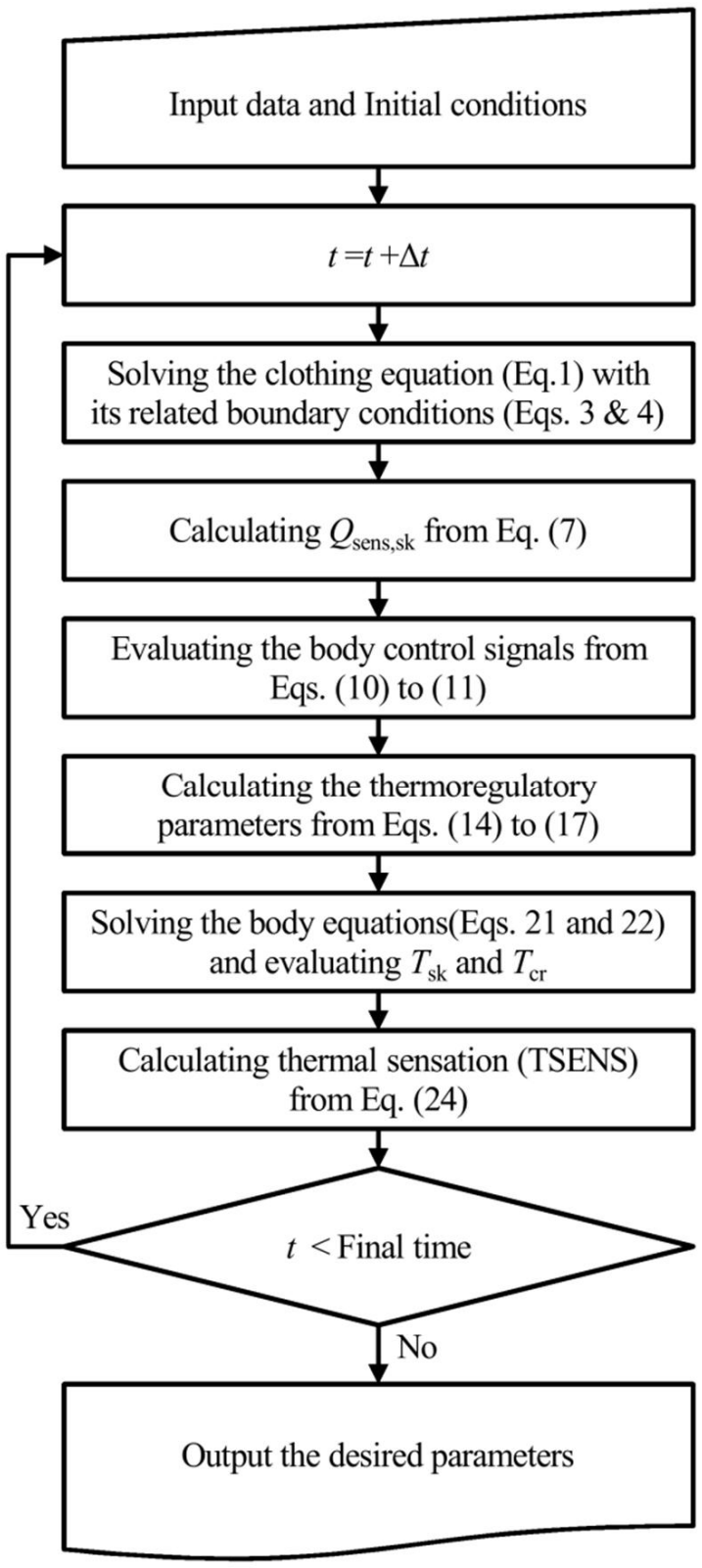


Fig. 2 Flowchart of the present study calculations

شکل2 طرح‌واره روند محاسبات در تحقیق حاضر

1- Thermal Sensation (*TSENS*)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

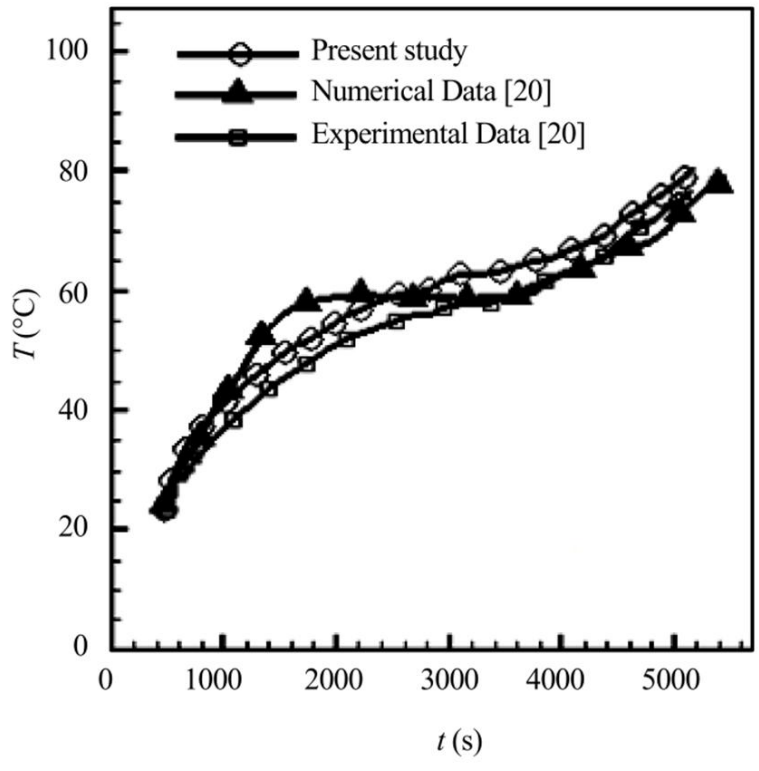


Fig. 3 Comparison of the present study results with numerical and experimental results of Tian and Zhao[20]

شکل3 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو[20]

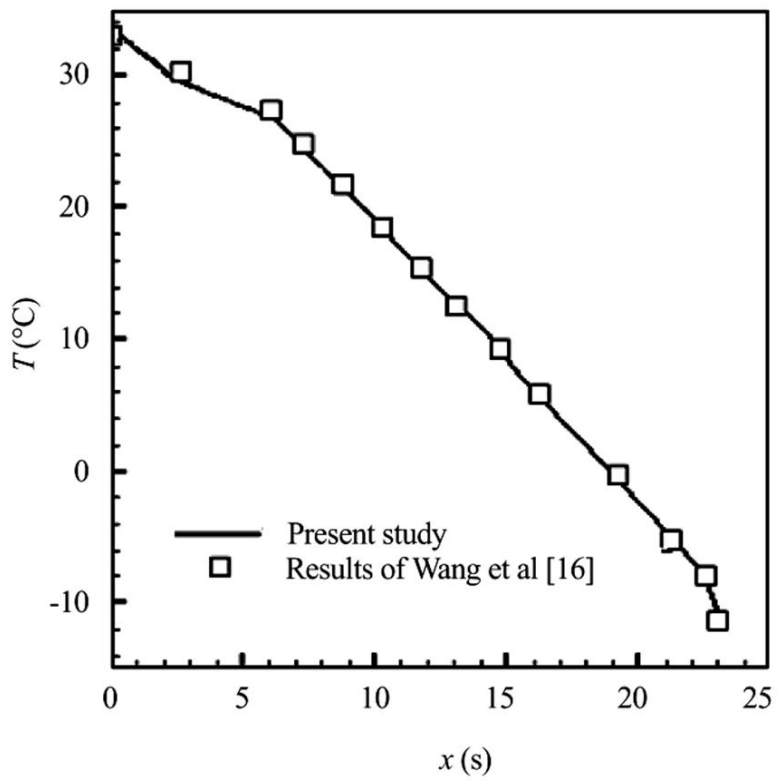


Fig. 4 Comparison of the present study results with the results of Wang et al [16]

شکل4 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج وانگ و همکاران[16]

همچنین با توجه به سطح فعالیت آتش‌نشانان، نرخ متابولیک فرد برابر با met 2 فرض شده و مطابق با استاندارد آسایش حرارتی اشری [19]، نرخ کار مکانیکی برای بدن ناچیز است. در ادامه، نتایج مربوط به شاخص احساس حرارتی افراد تحت شرایط بحرانی به ازای سه آرایش مختلف برای لایه‌های پوشش محافظ ارائه می‌شود.

5-1- استفاده از ماده تغییرفازدهنده در پوشش محافظ با آرایش نوع یک

در این بخش نمودارهای مربوط به شاخص احساس حرارتی فرد، سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم دمای بدن (میزان‌تری پوست و کسر جرمی پوست) و میزان پیشروی پیشانی ذوب ماده تغییرفازدهنده برای پوشش محافظ با آرایش نوع یک مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین، به تأثیر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد حرارتی پوشش محافظ به ازای 5 دمای ذوب مختلف (40، 50، 60، 70 و 80 درجه سلسیوس) پرداخته خواهد شد. در شکل 5، تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی افراد دارای پوشش محافظ نوع یک، تحت شرایط گرمای سوزان به ازای 5 دمای ذوب مختلف برای ماده تغییرفازدهنده نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در پوشش محافظ نوع یک، دمای نزدیک به 40 درجه سلسیوس است. بر این اساس، به‌کارگیری ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس در پوشش محافظ نوع یک موجب می‌شود تا زمان تحمل افراد به حدود 900 ثانیه افزایش یابد. این در حالی است که اگر در شرایط کاملا مشابه، تنها از ماده تغییرفازدهنده در لباس استفاده نشود، مدت زمان تاب‌آوری افراد در شرایط گرمای سوزان حدود 300 ثانیه خواهد بود.

به منظور توجیه رفتار فیزیکی ماده تغییرفازدهنده در محافظت حرارتی از بدن در شرایط گرمای سوزان، نمودار پیشروی ذوب این مواد برحسب زمان به صورت شکل 6 ارائه شده است. طبق انتظار، زمان ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده با افزایش دمای ذوب آن افزایش می‌یابد. اما نکته قابل تأمل این است که فقط ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40°C به طور کامل در زمانی که فرد در شرایط حرارتی مجاز قرار دارد، ذوب می‌شود. به بیان دیگر، در صورتی که دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده افزایش یابد، تا زمانی که احساس حرارتی افراد در محدوده مجاز قرار دارد، بخشی از PCM به صورت ذوب نشده باقی می‌ماند و همین امر موجب می‌شود که از تمام ظرفیت ماده تغییر فاز دهنده در جهت بهبود عملکرد حرارتی پوشش محافظ استفاده نشود. به همین دلیل است که مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 50، 60، 70 و 80 درجه سلسیوس سهم زیادی در بهبود عملکرد پوشش‌های محافظ در شرایط مذکور ندارند.

براساس آن‌چه که گفته شد، باید به این نکته توجه کرد که در پوشش-های محافظ، استفاده از ماده تغییرفازدهنده‌ای مناسب است که در زمان از بین رفتن کارایی سازوکارهای فیزیولوژیکی نظیر اتساع رگ‌ها و تعرق بدن، ذوب شود تا از کل ظرفیت گرمای نهان این ماده تغییرفازدهنده استفاده شده و این ماده بتواند با جذب گرمای بیشتر، تأثیر بیشتری در بهبود احساس حرارتی فرد داشته باشد.

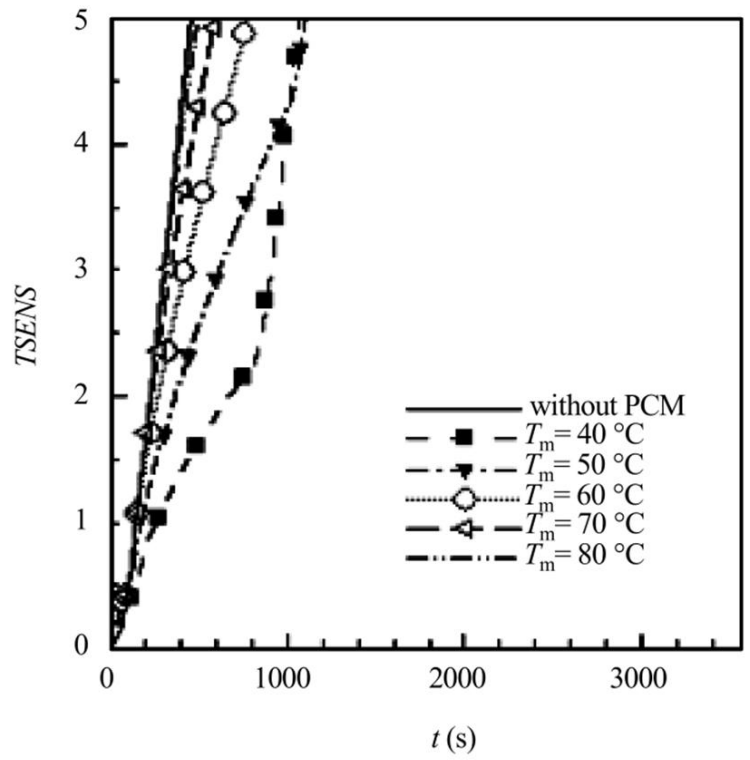


Fig. 5 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 1

شکل5 تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع یک

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

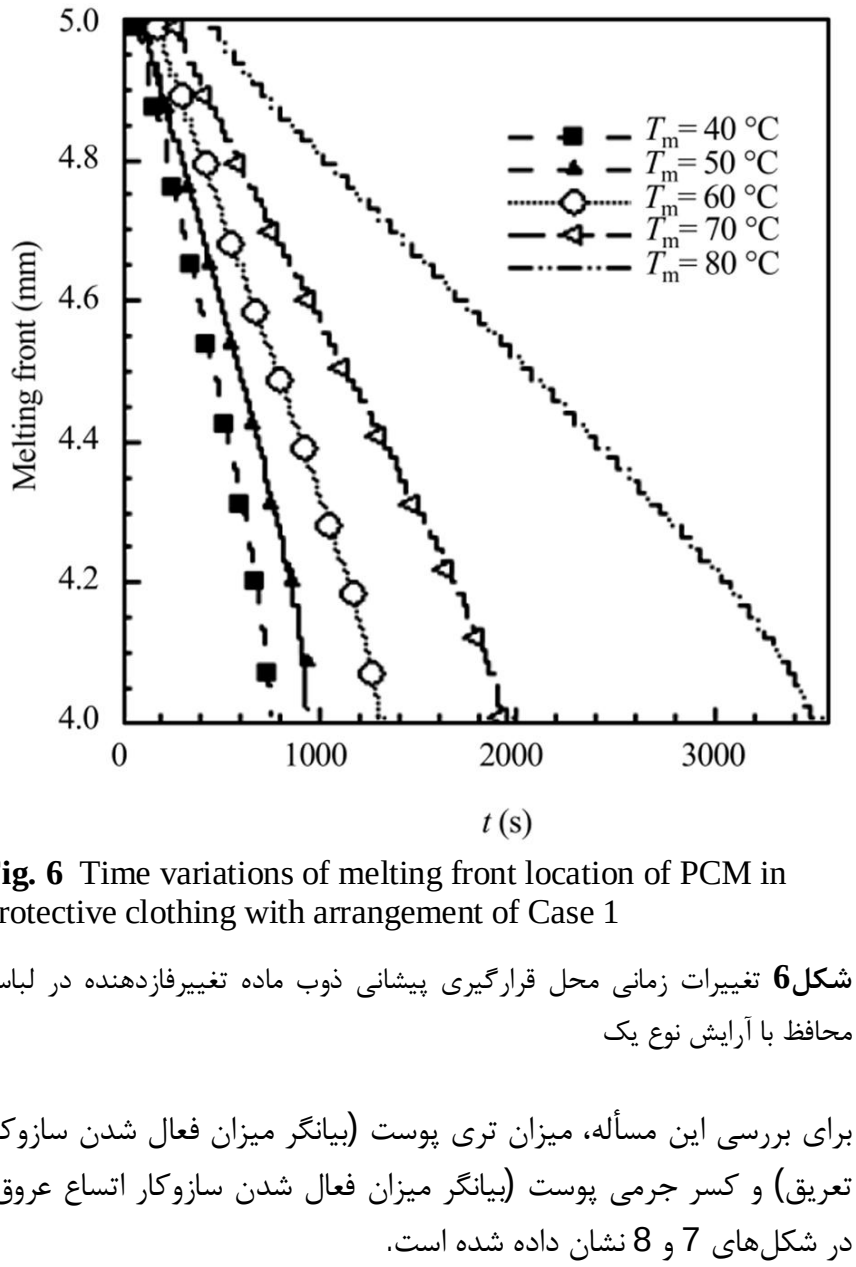


Fig. 6 Time variations of melting front location of PCM in protective clothing with arrangement of Case 1

شکل6 تغییرات زمانی محل قرارگیری پیشانی ذوب ماده تغییرفازدهنده در لباس محافظ با آرایش نوع یک

برای بررسی این مسأله، میزان تری پوست (بیانگر میزان فعال شدن سازوکار تعریق) و کسر جرمی پوست (بیانگر میزان فعال شدن سازوکار اتساع عروق) در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، با افزایش دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده از 40 تا 80 درجه سلسیوس، پوست سریع‌تر در اثر تعریق خیس شده و در واقع اثر سازوکار تعریق برای خنک نگه‌داشتن بدن، فقط منحصر به زمان‌های کوتاه اولیه است و پس از آن تأثیر سازوکار تعریق از بین

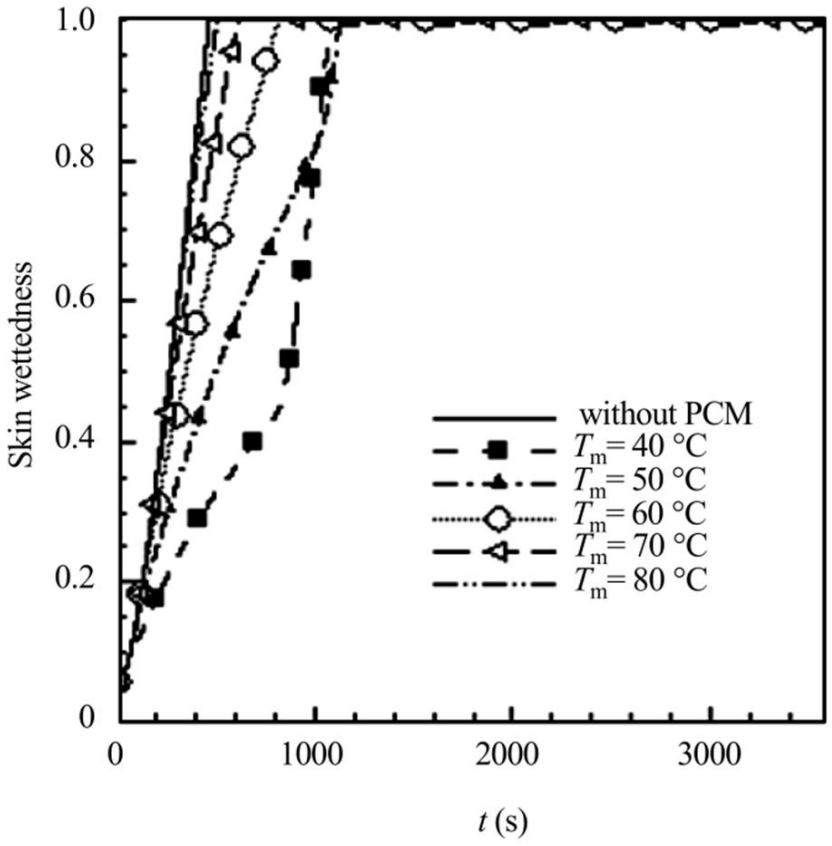


Fig. 7 Time variations of skin wettedness due to regulatory sweating for a person with protective clothing with arrangement of Case 1

شکل7 تغییرات زمانی میزان تری پوست ناشی از تعریق تنظیمی برای فرد دارای پوشش محافظ با آرایش نوع یک

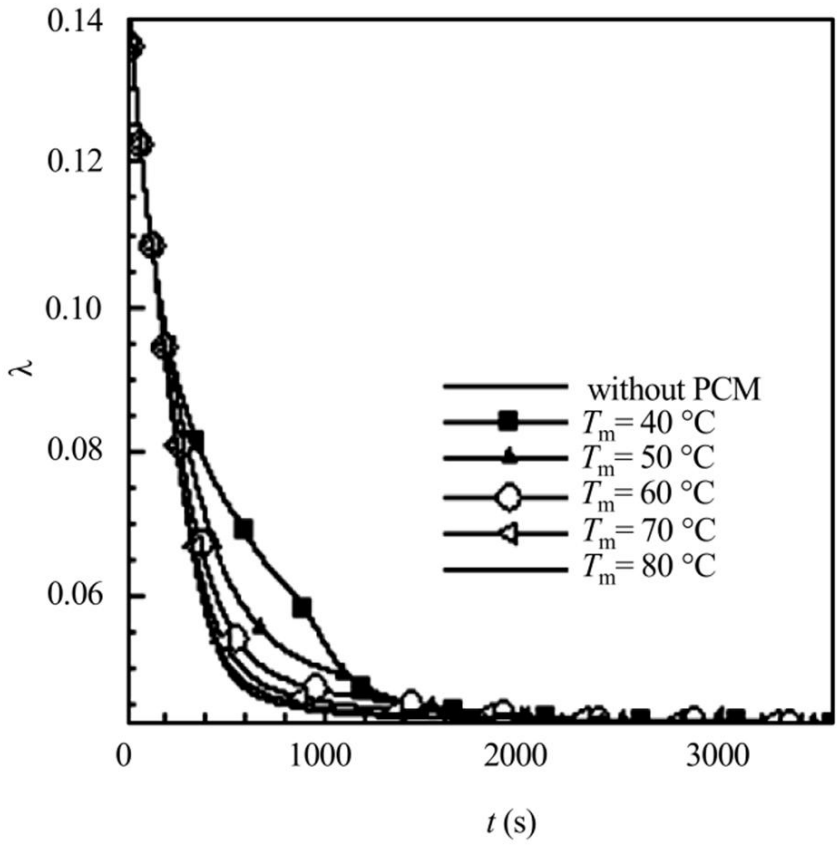


Fig. 8 Time variations of skin mass fraction for different melting temperature of PCM used in Case 1 protective clothing

شکل8 تغییرات زمانی کسر جرمی پوست به ازای تغییر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده به‌کار رفته در پوشش محافظ نوع یک

می‌رود. بر این اساس، ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب 40°C، باعث می‌شود که زمان تأثیرگذاری سازوکار تعریق افزایش یابد. ضمن این‌که بازه زمانی ذوب ماده تغییر فاز دهنده مذکور انطباق بیشتری با زمان فعال شدن سازوکارهای تنظیم حرارت بدن انسان دارد.

شایان ذکر است که در شرایط گرما، سازوکار اتساع رگها باعث می‌شود که کسر جرمی پوست تغییر کند. بر این اساس، سازوکار اتساع عروق باعث می‌شود که سهم بخش مرکزی بدن که دمای آن نزدیک به دمای 37 درجه سلسیوس است، بیشتر شود و لذا کسر جرمی پوست کاهش یابد. بنابراین در هنگام سرمای شدید، کسر جرمی پوست حداکثر مقدار را دارد و هر چه دما بالاتر رود، عروق جانبی بدن گشادتر می‌شود و در نتیجه کسر جرمی پوست کم شده و نهایتا تحت شرایط گرمای شدید به حداقل مقدار خود می‌رسد. همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، با به کار بردن ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس، بدن به مدت زمان بیشتری می‌تواند از سازوکار اتساع عروق جانبی به‌منظور مطلوب ساختن شرایط احساس حرارتی افراد بهره گیرد.

با توجه به نمودارهای 5 تا 8 می‌توان چنین نتیجه گرفت که بکارگیری ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس در پوشش محافظ با طرح یک باعث می‌شود که PCM از زمان حدود 200 ثانیه شروع به ذوب شدن کند و نهایتا تا زمان نزدیک به 800 ثانیه به‌طور کامل ذوب شود. این در حالی است که در این بازه‌ی زمانی، سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن نیز به طور مؤثری در حال فعالیت هستند و حتی تا حدود 100 ثانیه پس از ذوب کامل ماده تغییرفازدهنده نیز عملکرد سازوکارهای تنظیم حرارت بدن به‌طور محسوسی به بهبود شرایط احساس حرارتی افراد کمک می‌کند. به همین دلیل است که ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب نزدیک به 40 درجه می‌تواند نسبت به سایر حالت‌ها عملکرد بهتری را از خود نشان دهد. این در حالی است که مواد تغییر فاز دهنده با دمای ذوب بالاتر کارآیی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

حرارتی کمتری را از خود نشان می‌دهد؛ به طوری که ماده تغییر فاز دهنده دارای دمای ذوب 80°C، تا هنگامی که احساس حرارتی افراد در محدوده مجاز قرار دارد، هنوز ذوب نشده و فقط به‌صورت یک عایق حرارتی نامناسب در این لایه ایفای نقش می‌کند و بنابراین کمکی به‌بهبود شرایط آسایش حرارتی افراد نخواهد کرد.

5-2- استفاده از PCM در پوشش محافظ با آرایش نوع دو و سه

در شکل‌های 9 و 10، تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی افراد دارای پوشش محافظ نوع دو و سه، تحت شرایط گرمای سوزان به ازای تغییر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های 5، 9 و 10 مشاهده می‌شود که در شرایط حرارتی بحرانی سوزان، مناسب ترین آرایش برای قرارگیری ماده تغییر فازدهنده در پوشش محافظ، آرایش نوع یک و بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده، دمایی حدود 40 درجه سلسیوس می‌باشد. بر این اساس، شکل 11 برای ایجاد امکان مقایسه بهتر میان نتایج ناشی از به‌کارگیری ماده تغییر فاز دهنده با دمای 40 درجه سلسیوس، به ازای سه آرایش مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با نزدیک شدن لایه ماده تغییرفازدهنده به محیط سوزان، عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در محافظت از بدن در مقابل آسیب‌های حرارتی تضعیف می‌شود. به بیان دیگر، زمان تحمل افراد دارای پوشش محافظ فاقد مواد تغییرفازدهنده تحت شرایط گرمای سوزان حدود 300 ثانیه است. این در حالی است که با قرارگیری ماده تغییرفازدهنده در لایه مجاور محیط سوزان (پوشش با آرایش نوع سه)، زمان تحمل افراد به حدود 450 ثانیه می‌رسد. این در حالی است که با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع دو، زمان تاب‌آوری حرارتی افراد به حداکثر 600 ثانیه و با پوشش محافظ با آرایش نوع یک، به حدود 900 ثانیه افزایش می‌یابد.

6- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تاثیر به‌کارگیری مواد تغییرفازدهنده در پوشش‌های محافظ آتش‌نشان‌ها بر زمان تاب‌آوری حرارتی تحت شرایط بحرانی گرمای سوزان پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده با آرایش و دمای ذوب مناسب در پوشش‌های محافظ می‌تواند تا حد چشمگیری بر میزان افزایش زمان تحمل حرارتی فرد تحت شرایط گرمای سوزان تأثیرگذار باشد. به‌طوری که بهترین محل برای قرارگیری ماده تغییرفازدهنده، لایه میانی یعنی پوشش دارای آرایش نوع یک می‌باشد. در این حالت، ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس بهترین

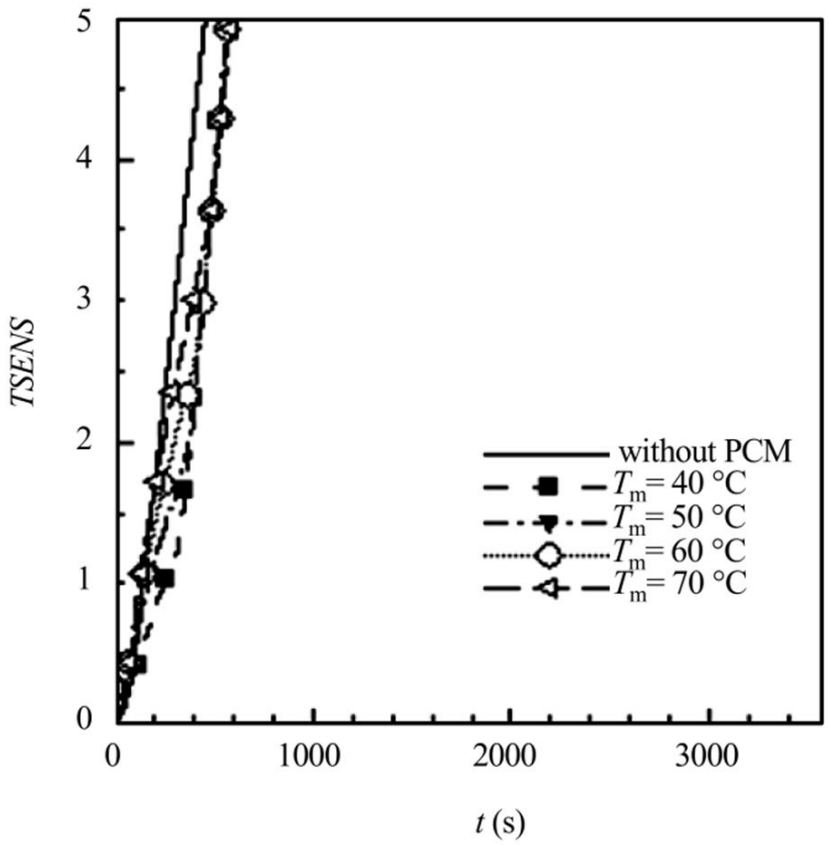


Fig. 10 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 3

شکل10 تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع سه

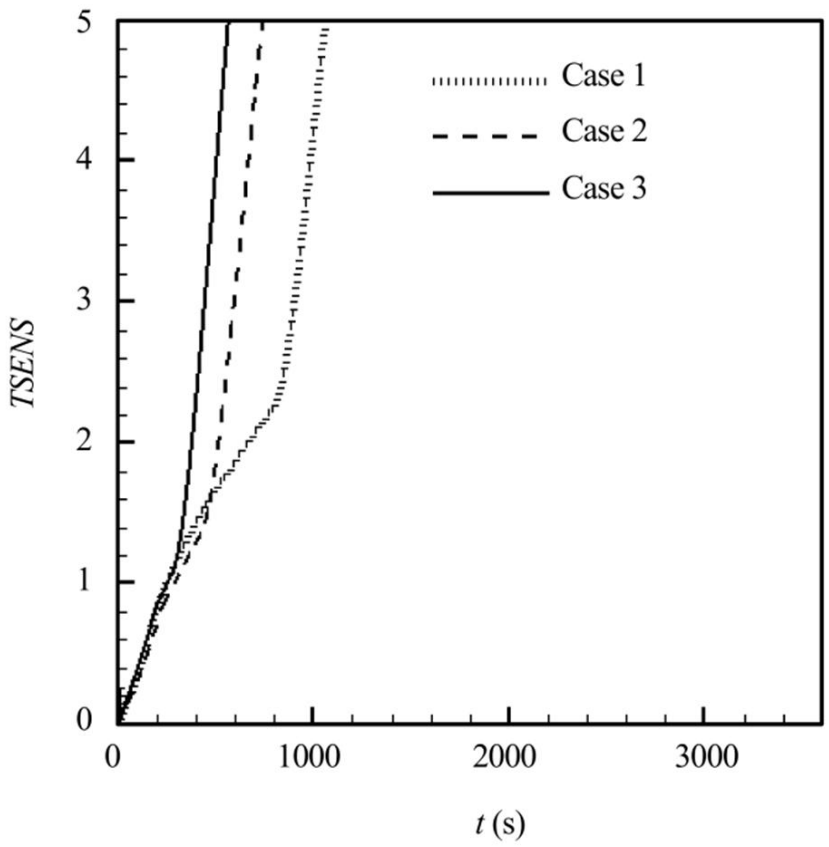


Fig. 11 Comparison of thermal sensation index for using three different arrangements of protective clothing contains a PCM layer with 40°C melting point

شکل11 مقایسه شاخص احساس حرارتی در صورت بکارگیری سه آرایش مختلف برای پوشش‌های محافظ دارای یک لایه ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس

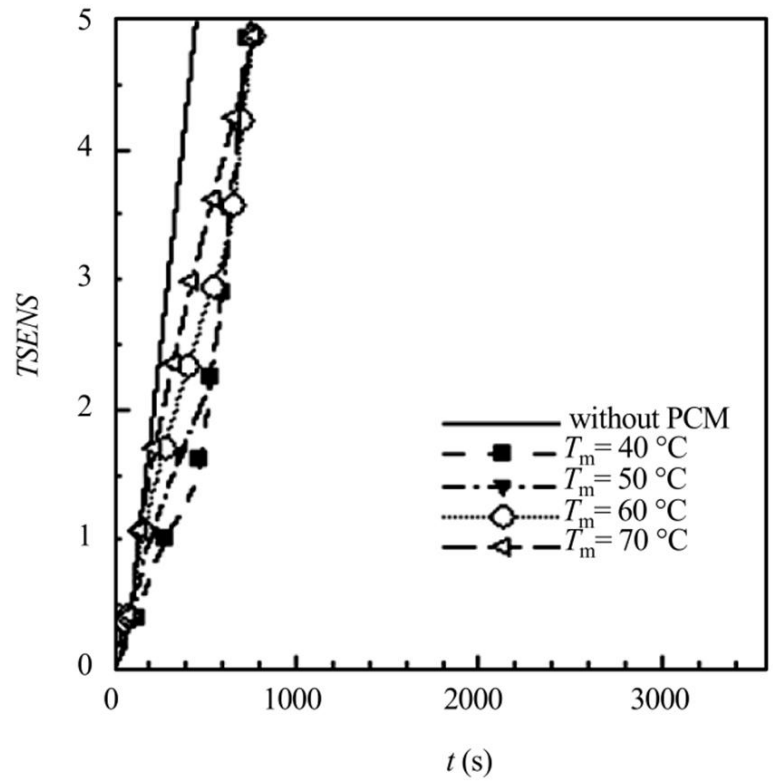


Fig. 9 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 2

شکل9 تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع دو

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]

عملکرد را از خود نشان می‌دهد و موجب می‌شود تا زمان تاب‌آوری فرد تا 3 برابر نسبت به حالت بدون ماده تغییرفازدهنده افزایش یابد و از 300 به حدود 900 ثانیه برسد. همین امر نشان دهنده تأثیر قابل توجه مواد تغییرفازدهنده بر عملکرد پوشش‌های محافظ در شرایط حرارتی گرمای سوزان می‌باشد.

7- فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی، (J/kgK)
$CSIG$	سیگنال سرمایی، (بی بعد)
k	ضریب هدایت حرارتی، (W/mK)
K_{eff}	مقدار مؤثر رسانش حرارت پوست و مرکز بدن، (W/m^2K)
L_f	گرمای نهان ذوب، (kJ/kg)
m	جرم بدن، (kg)
M	نرخ متابولیک، (W/m^2)
P	فشار جزئی بخار، (kPa)
Q	نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح بدن، (W/m^2)
$\dot{q}_{gen}$	نرخ تولید حرارتی حجمی، (W/m^3)
R_{et}	مقاومت حرارتی تبخیری کل برای لباس، (m^2kPa/W)
T	دما، $(°C)$
t	زمان، (s)
w	تری پوست، (بی بعد)
W	نرخ کار، (W/m^2)
$WSIG$	سیگنال گرمایی، (بی بعد)

علائم یونانی

λ	کسر جرمی پوست، (بی‌بعد)
η_{ev}	بازده تبخیری، (بی‌بعد)
ρ	چگالی، (kg/m^3)

زیرنویس‌ها

b	مربوط به بدن
bl	مربوط به خون
cl, i	مربوط به سطح داخلی لباس
cl, o	مربوط به سطح خارجی لباس
cr	مرکز بدن
ev	تبخیری
m	ذوب
n	خنثی
res	تنفسی
rsw	تعرق تنظیمی
sat	اشباع
Sens	محسوس
sk	پوست

8- مراجع

[1] S. Mondal, Phase change materials for smart textiles – An overview, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, No. 11, pp. 1536-1550, 2008.

[2] H. Shim, The use of phase change materials in clothing, *Textile Research Journal*, Vol. 71, No. 6, pp. 495-502, 2001.

[3] B. Pause, Textiles with improved thermal capabilities through the application of phase change material (PCM) microcapsules, *Melliand Textilberichte*, Vol. 8, No. 9, pp. 753–754, 2000.

[4] M. A. Hamdan, I. Al-Hinti, Analysis of heat transfer during the melting of a phase-change material, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 13, pp. 1935-1944, 2004.

[5] G. S. Chung, D. H. Lee, A study on comfort of protective clothing for firefighters, *Environmental Ergonomics*, Vol. 3, pp. 375-378, 2005.

[6] R. E. Reinertsen, Optimizing the performance of phase change materials in personal protective clothing systems, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 14, No. 1, pp. 43-53, 2008.

[7] G. Zsembinszki, M. Farid, F. Cabiza, Analysis of implementing phase change materials in open-air swimming pools, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 1, pp. 567-577, 2012.

[8] Y. Hu, D. Huang, Z. Qi, S. He, H. Yang, H. Zhang, Modeling thermal insulation of firefighting protective clothing embedded with phase change material, *Heat Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 567-573, 2013.

[9] F. Zhu, Q. Feng, R. Liu, B. Yu, Y. Zhou, Enhancing the Thermal Protective Performance of Firefighters' Protective Fabrics by Incorporating Phase Change Materials, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, Vol. 23, No. 2, pp. 68-73, 2015.

[10] R. Lawson, E. Mell, A heat transfer model for firefighter's protective clothing, continued development in protective clothing modeling, *Fire Technology*, Vol. 46, pp. 833-841, 2010.

[11] 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.

[12] S. X. Wang, Y. Li, J. Y. Hu, T. Hiromi, Q. W. Song, Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing, *Polymer Testing*, Vol. 25, pp. 580-587, 2006.

[13] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. Gracia, A. I. Fernandez, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings, A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1675-1695, 2011.

[14] C. K. Halford, R. F. Boehm, Modeling of phase change material peak load shifting, *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 298-305, 2007.

[15] M. Solhi, *Analysis of thermal performance of phase change material used for building wall insulation*, MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, 2013. (in Persian فارسی)

[16] S. X. Wang, Y. Li, J. Y. Hu, T. Hiromi, Q. W. Song, Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing, *Polymer Testing*, Vol. 25, pp. 580-587, 2006.

[17] D. Morgan, R. Baskett, Comfort of man in the city. An energy balance model of man – Environment coupling, *International Journal of Biometeorology*, Vol. 18, No. 3, pp. 184-98, 1974.

[18] M. Maerefat, A. Omidvar, *Thermal comfort*, Kelid-Amoozesh Publications, Tehran, 2008. (in Persian فارسی)

[19] ASHRAE handbook-fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2001.

[20] Y. Tian, C. Y. Zhao, A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals, *Energy*, Vol. 36, pp. 5539-5546, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.20.6]