



تأثیر به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ آتش‌نشان‌ها بر زمان تاب‌آوری حرارتی

سید علیرضا ذوالفقاری^{1*}، محمد فتحیان²، محسن طالبی³

- 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 تغییر فاز دهنده
 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 تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده 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 تغییر فاز دهنده به همراه سازوکارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن انسان می‌باشد. برای این منظور، یک پوشش محافظ چند لایه شامل یک لایه ماده تغییر فاز دهنده 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 فاز دهنده 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 تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ می‌تواند زمان تاب‌آوری 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

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

ایجاد محیطی سالم و مطبوع توأم با آسایش حرارتی¹ برای افراد، در شرایط محیطی مختلف مساله‌ای مهم به حساب می‌آید. این امر به ویژه در شرایط بحرانی² که بدن قادر نیست تا با استفاده از سازوکارهای فیزیولوژیکی، خود را

- 1- Thermal comfort
 2- Critical condition

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 پذیرفته 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 تاب‌آوری 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 تاب‌آوری 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 تغییرفازدهنده 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 پیش‌بینی 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 تابشی³ 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	هدایت حرارتی	گرمای ویژه
	(kg/m ³)	(W/mK)	(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

ناشی از آن محافظت کنند. از جمله شیوه‌های نوین در زمینه طراحی پوشش‌های محافظ، استفاده از مواد تغییرفازدهنده (PCM¹) در این پوشش‌ها است. موادی که به خاطر ویژگی‌هایی که به لباس می‌دهند، کارایی آن‌ها را در شرایط بحرانی به طور محسوس 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 ناسا² 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 الهیبتی [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 لباس‌های 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

1- Phase Change Materials

2- NASA

3- Radiant shell

رابطه (2) به بازه دمایی ذوب (محدوده خمیری شدن) ماده تغییر فاز دهنده مربوط می شود. با بررسی خواص حرارتی مربوط به مواد تغییر فاز دهنده متداول در کاربردهای مربوط به منسوجات و پوشش های 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 می باشد. با جای گذاری ظرفیت گرمایی اصلاح شده در رابطه (1)، معادله انتقال حرارت یک بعدی برای مواد تغییر فاز دهنده به دست می آید. همچنین، شرایط مرزی در سمت خارجی لباس با در نظر گرفتن سازوکارهای انتقال حرارت جابه جایی و تابش مطابق با رابطه (3) منظور شده است:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{cl,o} = h_c (T_{cl,o} - T_{air}) + \varepsilon \sigma ((T_{cl,o} + 273)^4 - (T_{mr} + 273)^4) \quad (3)$$

که h_c ضریب انتقال حرارت جابه جایی روی سطح لباس (W/m^2K)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$)، ε ضریب صدور سطح لباس (بی بعد) و دمای متوسط تابشی ($^{\circ}C$) می باشد. ضمناً در تحقیق حاضر از مقاومت حرارتی میان بدن و لباس صرف نظر شده است و بر این اساس، شرط مرزی سمت داخلی لباس مطابق با رابطه (4) و بر مبنای دمای سطح پوست فرد تعیین می شود:

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

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 می شود.

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

بدن انسان را می توان به منزله ی یک موتور حرارتی فرض نمود که در آن انرژی ورودی از طریق سوخت و ساز 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 می گردد. همچنین، در صورتی که بدن نتواند همه حرارت غیر قابل مصرف را با محیط تبادل کند، بخش باقیمانده ی این انرژی حرارتی در بدن ذخیره (S) می شود. بنابراین می توان معادله ی موازنه ی انرژی برای بدن را به صورت رابطه (5) و بر حسب وات بر متر مربع سطح بدن نوشت [17]:

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

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

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

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

$$Q_{sens,sk} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{cl,i} \quad (7)$$

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

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

با توجه به این که، سازوکار ترقق موجب می شود که بخشی از سطح پوست همواره خیس باشد، w تری پوست² (بی بعد) است و به صورت کسری از سطح

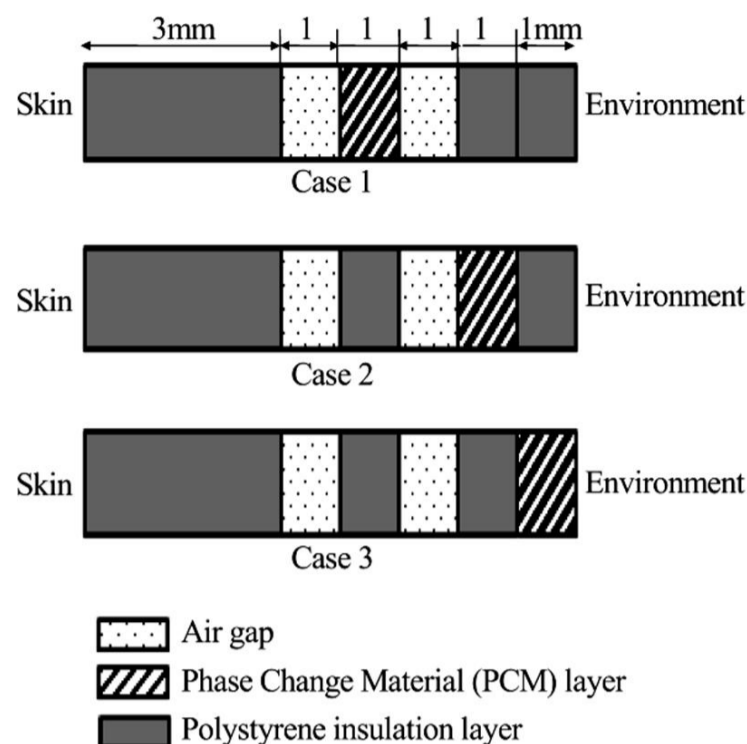


Fig. 1 Three different arrangements for placement of PCM layer in the protective clothing

شکل 1 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 لایه های مختلف لباس به صورت رابطه (1) قابل ساده سازی است:

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

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 لایه های جامد و هم لایه های تغییر فاز دهنده کاربرد دارد. بر این اساس، مقدار $C_{p,eff}$ برای لایه های جامد تقریباً مقداری ثابت دارد. این در حالی است که تعریف $C_{p,eff}$ برای مواد تغییر فاز دهنده با پیچیدگی بیشتری مواجهه است. لازم به توضیح است که ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده قبل از رسیدن به محدوده دمای ذوب، تقریباً مقداری ثابت دارد. اما پس از رسیدن دمای ماده به محدوده دمای ذوب، ماده شروع به خمیری شدن می کند و گرما را به صورت نهان در خود ذخیره می کند. این فرآیند را می توان به صورت افزایش فرضی ظرفیت گرمایی ماده نیز مورد مدل سازی قرار داد. بر این اساس، می توان چنین فرض کرد که در هنگام تغییر فاز، ظرفیت گرمایی مؤثر ماده افزایش می یابد و قابلیت ماده در ذخیره سازی حرارت به طور محسوسی بیشتر می شود. 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 گوس¹ [14] است. بر این اساس، می توان ظرفیت گرمایی مؤثر برای مواد تغییر فاز دهنده را به شکل رابطه (2) تعریف نمود [15]:

$$C_{p,eff} = C_{p0} + \frac{L_f}{\beta \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \left(\frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right)^2 \right] \quad (2)$$

که C_{p0} ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد، L_f گرمای نهان ذوب ماده تغییر فاز دهنده و T_m متوسط دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده است. همچنین، β بیانگر انحراف از معیار تابع توزیع نرمال گوس است و در

2- Skin wettedness

1- Gauss

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 می دهد:

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

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

$$\dot{m}_{bl} = \frac{6.3 + 200 \text{WSIG}_{cr}}{3600(1 + 0.5 \text{CSIG}_{sk})} \quad (15)$$

یکی دیگر از سازوکارهای فیزیولوژیکی کنترل دمایی 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 $\text{kg/m}^2\text{s}$ می باشد و توسط رابطه (17) قابل محاسبه است [18]:

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

که WSIG_b سیگنال های گرمایی مربوط به کل بدن بوده و به شکل زیر تعریف می شود:

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

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

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

3-4- 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 مدل سازی قرار می گیرد. بر این اساس، شرایط مرزی سمت بدن، بر مبنای شرایط فیزیکی و فیزیولوژیکی فرد در طول زمان متغیر است و بسته به این که میزان تنش های حرارتی وارد بر بدن چه میزان باشد، شرایط بدن می تواند تغییر کند. لذا در تحقیق حاضر، از مدل ناپایای گایج¹ به منظور مدل سازی شرایط حرارتی بدن به صورت پویا و وابسته به زمان استفاده شده است.

در سال 1986، گایج مدل دونقطه ای² خود را ارائه نمود. مدل وی بر اساس معادله ی موازنه ی انرژی بدن در شرایط گذرا (وابسته به زمان) توسعه یافته است. در این مدل، بدن به صورت دو استوانه ی هم محور مدل می شود که استوانه داخلی نماینده اعضای مرکزی بدن و استوانه خارجی نشانگر پوست بدن می باشد. با تلفیق معادلات انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده و معادلات اصلی مدل گایج، معادلات موازنه ی انرژی برای پوست و بخش مرکزی بدن به صورت روابط (21) و (22) نوشته می شود:

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

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

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

پوست بدن که از آب پوشیده شده است، تعریف می گردد. همچنین، $P_{sk, sat}$ فشار بخار اشباع بر سطح پوست (kPa)، P_{air} فشار بخار هوا (kPa) و R_{et} میزان مقاومت تبخیری لباس ($\text{m}^2\text{kPa/W}$) می باشد. شایان ذکر است که مقاومت حرارتی لباس به میزان تراوایی لایه های لباس و نفوذپذیری جرمی آن وابسته است. اما توجه به این نکته ضروری است که در شرایط بحرانی، زمان تاب آوری حرارتی آتش نشانان بسیار کوتاه و در حدود چند دقیقه است؛ لذا در این زمان کوتاه، امکان نفوذ جرمی تعرق به همه لایه های لباس وجود ندارد و در نتیجه، تنها لایه هایی از لباس که در مجاورت سطح بدن قرار دارند و دارای مقاومت تبخیری کمتری هستند می توانند بر نرخ انتقال حرارت تبخیری از سطح بدن اثرگذار باشند. به بیان دیگر، در این زمان کوتاه، نفوذ جرمی تعرق به اندازه ای نیست که بتواند تا محل قرارگیری لایه ماده تغییرفازدهنده نفوذ کند و لذا تعرق این فرصت را پیدا نمی کند که بیش از لایه 3 میلی متری لباس که میان بدن و اولین لایه هوا قرار گرفته است، نفوذ نماید. در نتیجه می توان 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 میلی متری مجاور سطح بدن و مقدار فشار بخار هوا (P_{air}) بر مبنای شرایط اولین لایه هوا در لباس در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه اتلافات حرارتی ناشی از تنفس را می توان با استفاده از رابطه ی (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 می کند که اصطلاحاً به آن ها، سازوکارهای تنظیم حرارت بدن گفته می شود. این سازوکارها که از طریق سیگنال های فرستاده شده توسط حسگرهای دمایی بدن عمل می کنند، عبارتند از: تعرق تنظیمی، افزایش متابولیک ناشی از لرز، اتساع و انقباض رگ ها. شایان ذکر است که قدرت سیگنال های حرارتی بدن به میزان اختلاف دمای پوست یا مرکز با دمای حالت خنثی برای این بخشها بستگی دارد. بر این اساس سیگنال های حرارتی برای بخش های مرکزی و پوست به صورت زیر تعریف می شوند:

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

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

که WSIG_{sk} و WSIG_{cr} به ترتیب بیانگر سیگنال های 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:

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

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

همان طور که گفته شد، یکی از سازوکارهای تنظیم حرارت بدن اتساع و انقباض رگ ها است. این سازوکار باعث می شود تا در شرایط گرما، رگ ها 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 رگ های جانبی بدن موجب می شود که خون کمتری به پوست برسد و حرارت بدن کمتر تلف شود. بر این اساس، سازوکار اتساع و انقباض عروق موجب می شود که نرخ شارش خون در بخش

1- Gagge
2- Two-node

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 لایه های 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 پایین تر از -3 فرد دچار آسیب حرارتی می شود. 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.

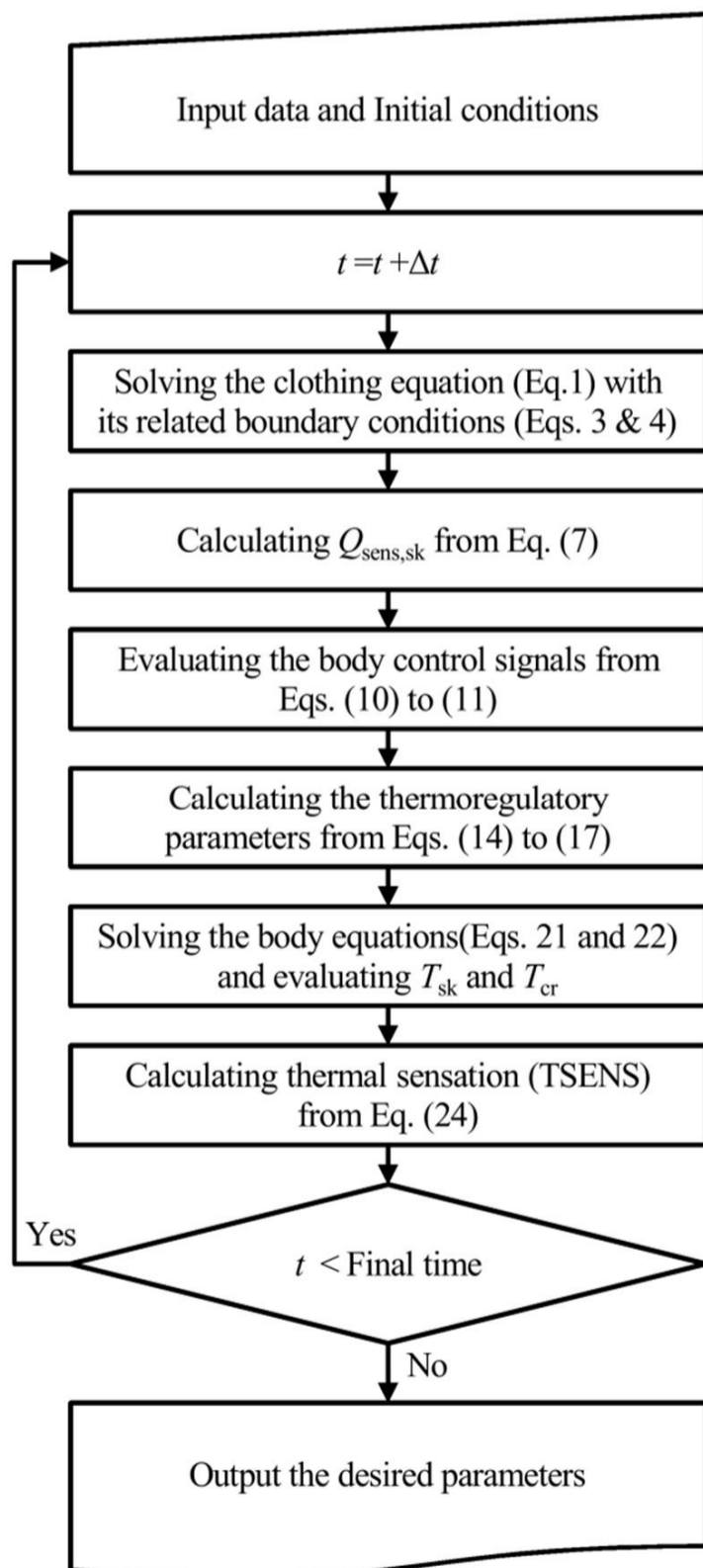


Fig. 2 Flowchart of the present study calculations

شکل ۲ طرحواره روند محاسبات در تحقیق حاضر

[18]. همچنین، میزان تبادل حرارت میان پوست و مرکز بدن می باشد 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 مقدار مؤثر رسانش حرارت میان پوست و مرکز بدن ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) و ظرفیت گرمایی خون ($J/kg \cdot ^\circ C$) می باشد.

بر اساس آنچه که گفته شد، مدل دونقطه ای گایج با استفاده از معادلات موازنه انرژی برای پوست و بخش مرکزی، دمای این بخش ها را محاسبه کرده و از این طریق، احساس حرارتی افراد را به کمک یک رابطه تجربی و بصورت شاخص $TSENS$ ¹ برآورد می کند [18].

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

که η_{ev} بازده تبخیری است و استاندارد آسایش حرارتی اشری [19] مقدار تقریبی 0.85 را برای آن پیشنهاد می دهد. البته شایان ذکر است که مقدار بازده تبخیری می تواند بسته به نوع پوشش افراد تغییر کند. با این حال، به دلیل عدم وجود اطلاعاتی در مورد مقدار بازده تبخیری برای پوشش های 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 می شود. به طوری که هر عدد صحیح بین این مقادیر، به این صورت به احساس حرارتی افراد مرتبط می شود: +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 مدل سازی انجام شده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مراجع [16] و [20] مقایسه شده است. بر این اساس، ابتدا نتایج مدل سازی مربوط به ذوب ماده تغییرفازدهنده با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو [20] مورد مقایسه قرار گرفته است. شکل 3 تغییرات دما بر حسب زمان در ضخامت 0.008 متری را با گذشت زمان نشان می دهد. مقایسه نتایج مدل سازی 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 پوشش های محافظ دارای مواد تغییرفازدهنده مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود، توزیع دمای به دست آمده در لباس با نتایج وانگ و همکاران [16] تطابق بسیار خوبی دارد.

1- Thermal Sensation ($TSENS$)

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. همان طور که مشاهده می شود، 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، به کارگیری ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس در پوشش محافظ نوع یک موجب می شود تا زمان تحمل افراد به حدود 900 ثانیه افزایش یابد. این در حالی است که اگر در شرایط کاملاً مشابه، تنها از ماده تغییرفازدهنده در لباس استفاده نشود، مدت زمان تاب آوری 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 می یابد. 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 می شود. 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 می ماند و همین امر موجب می شود 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 70، 60، 50 و 80 درجه سلسیوس سهم زیادی در بهبود عملکرد پوشش های محافظ در شرایط مذکور ندارند.

براساس آنچه که گفته شد، باید به این نکته توجه کرد که در پوشش های محافظ، استفاده از ماده تغییرفازدهنده ای مناسب است که در زمان از بین رفتن کارایی سازوکارهای فیزیولوژیکی نظیر اتساع رگ ها 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.

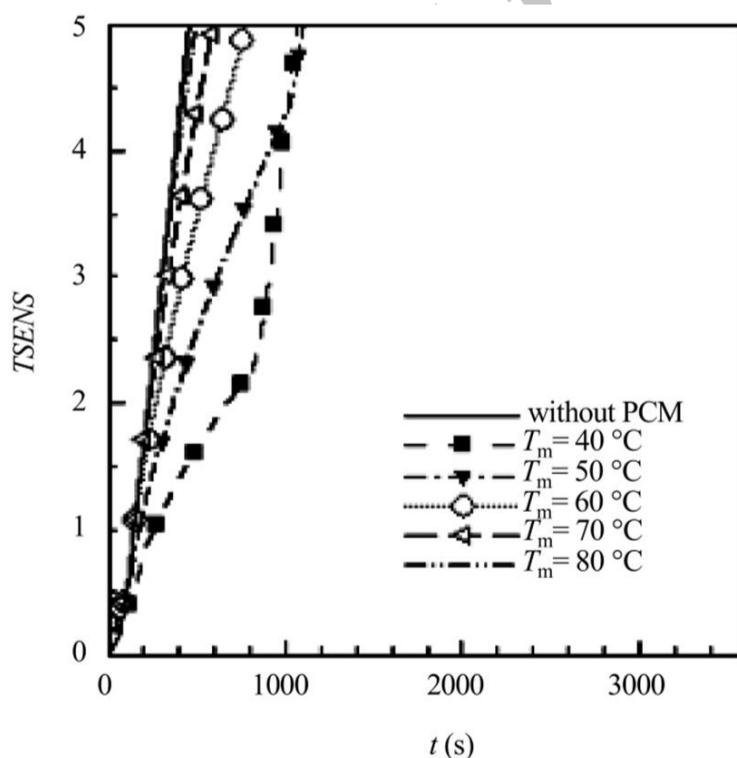


Fig. 5 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 1

شکل 5 تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع یک

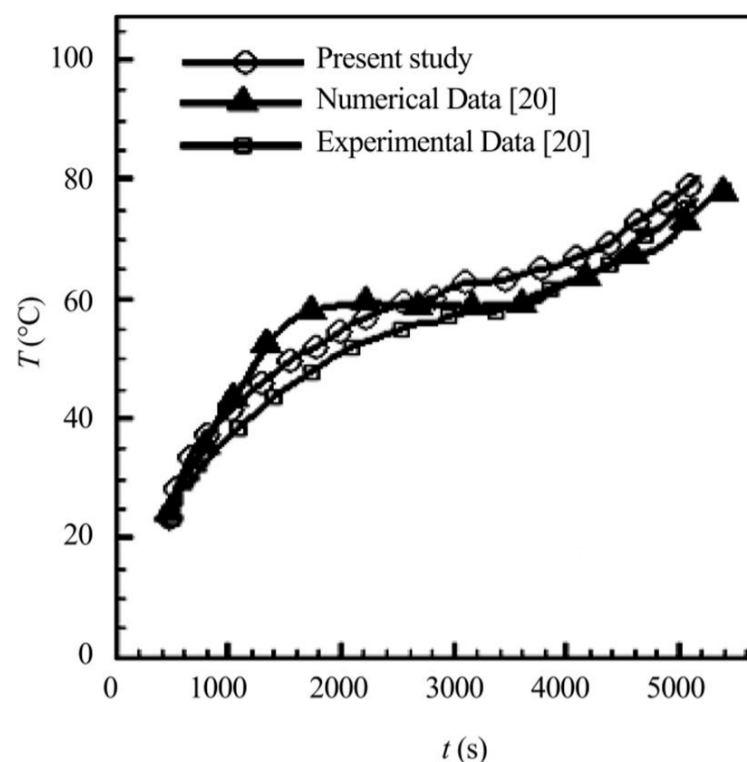


Fig. 3 Comparison of the present study results with numerical and experimental results of Tian and Zhao [20]

شکل 3 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو [20]

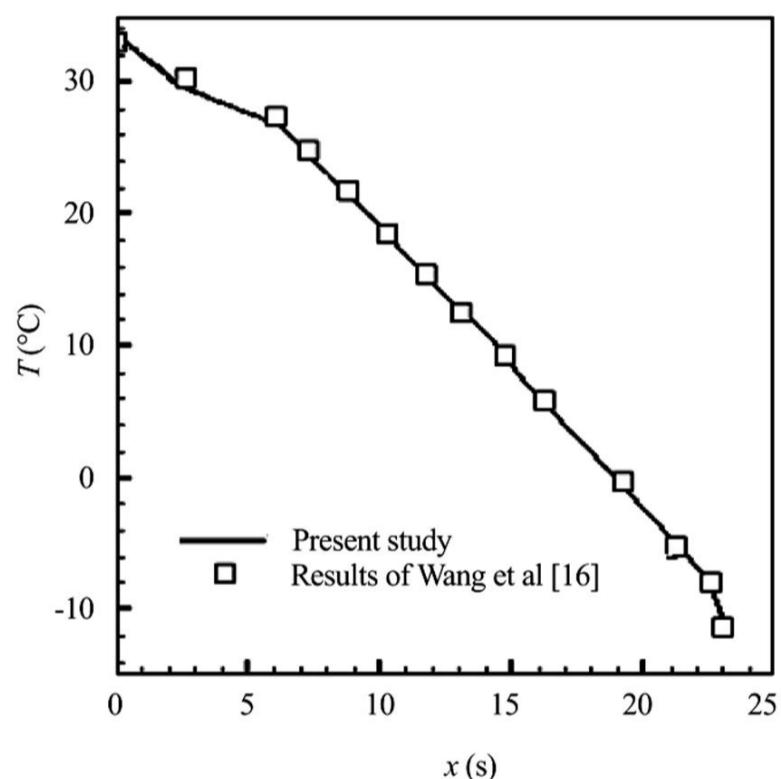


Fig. 4 Comparison of the present study results with the results of Wang et al [16]

شکل 4 مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج وانگ و همکاران [16]

همچنین با توجه به سطح فعالیت آتش نشانان، 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 لایه های پوشش محافظ ارائه می شود.

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 (میزان تری پوست و کسر جرمی پوست) و میزان پیشروی پیشانی ذوب ماده تغییرفازدهنده برای پوشش محافظ با آرایش نوع یک مورد بررسی قرار می گیرند. 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

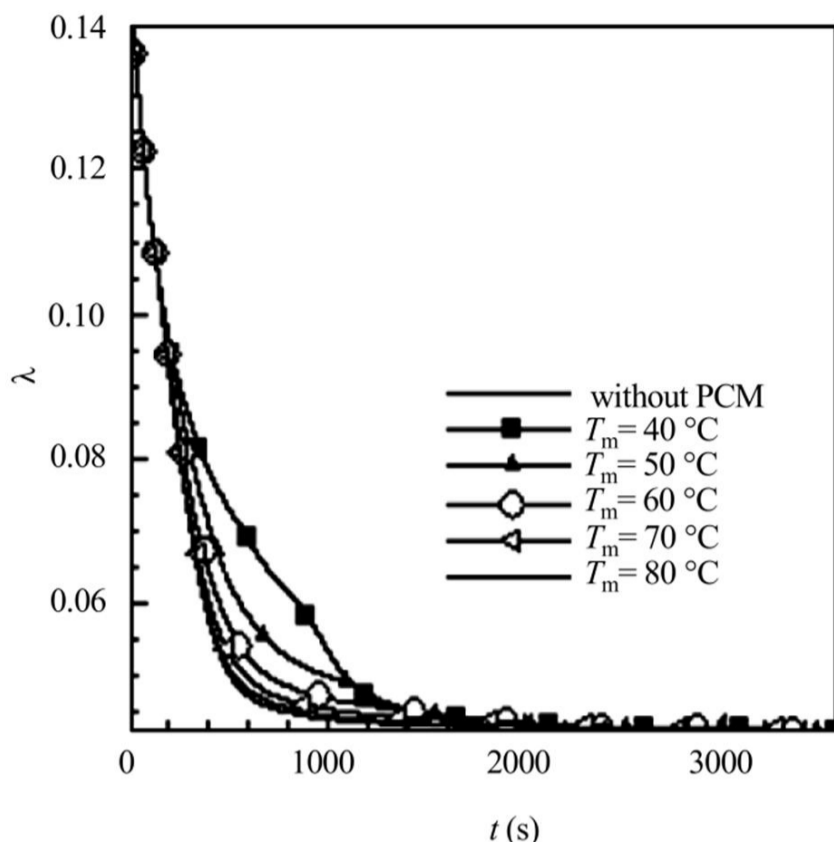


Fig. 8 Time variations of skin mass fraction for different melting temperature of PCM used in Case 1 protective clothing

شکل ۸ تغییرات زمانی کسر جرمی پوست به ازای تغییر دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده به کار 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°C 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 نهایتاً تحت شرایط گرمای شدید به حداقل مقدار خود می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با به کار بردن ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40°C درجه سلسیوس، بدن به مدت زمان بیشتری می‌تواند از سازوکار اتساع عروق جانبی به منظور مطلوب ساختن شرایط احساس حرارتی افراد بهره گیرد.

با توجه به نمودارهای ۵ تا ۸ می‌توان چنین نتیجه گرفت که بکارگیری ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40°C درجه سلسیوس در پوشش محافظ با طرح یک باعث می‌شود که PCM از زمان حدود ۲۰۰ ثانیه شروع به ذوب شدن کند و نهایتاً تا زمان نزدیک به ۸۰۰ ثانیه به‌طور کامل ذوب شود. این در حالی است که در این بازه‌ی زمانی، سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن نیز به‌طور مؤثری در حال فعالیت هستند و حتی تا حدود ۱۰۰ 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°C 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 کارایی حرارتی

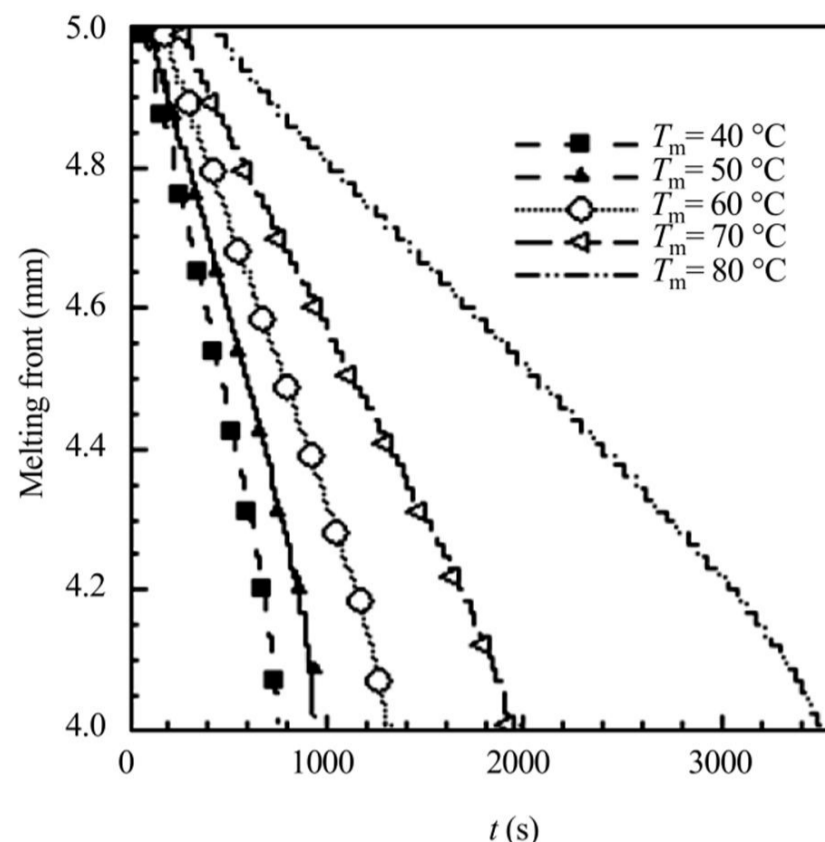


Fig. 6 Time variations of melting front location of PCM in protective clothing with arrangement of Case 1

شکل ۶ 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 ۷ و ۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده از 40°C تا 80°C 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

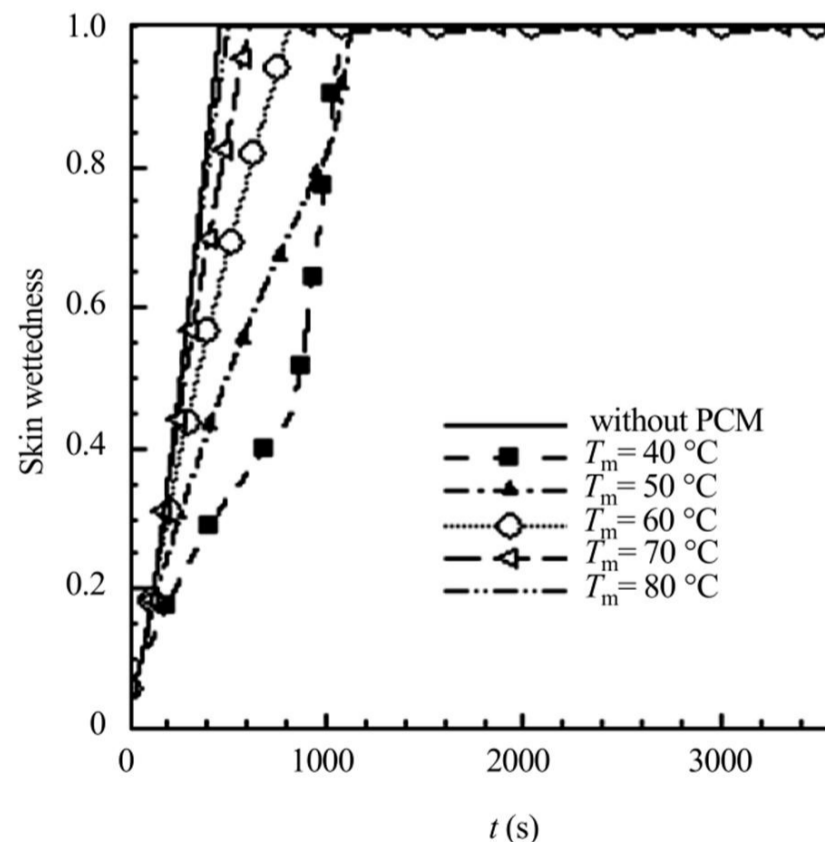


Fig. 7 Time variations of skin wettedness due to regulatory sweating for a person with protective clothing with arrangement of Case 1

شکل ۷ تغییرات زمانی میزان تری پوست ناشی از تعریق تنظیمی برای فرد دارای پوشش محافظ با آرایش نوع یک

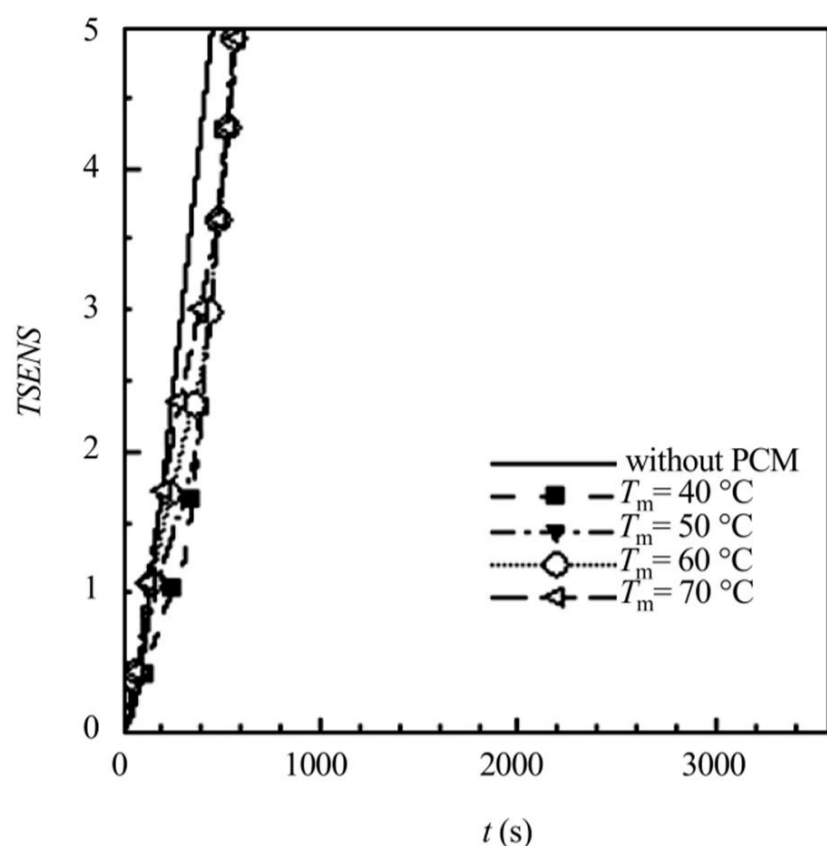


Fig. 10 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 3

شکل ۱۰ تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع سه

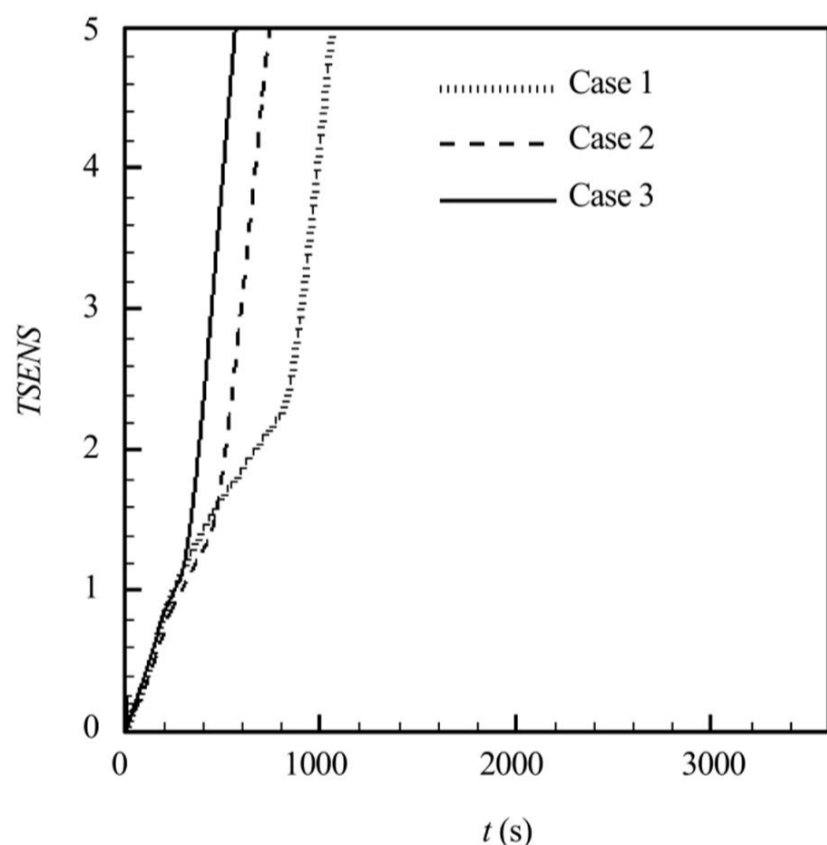


Fig. 11 Comparison of thermal sensation index for using three different arrangements of protective clothing contains a PCM layer with 40°C melting point

شکل ۱۱ مقایسه شاخص احساس حرارتی در صورت بکارگیری سه آرایش مختلف برای پوشش های محافظ دارای یک لایه ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس

سوزان پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با آرایش و دمای ذوب مناسب در پوشش های محافظ می تواند تا حد چشمگیری بر میزان افزایش زمان تحمل حرارتی فرد تحت شرایط گرمای سوزان تأثیرگذار باشد. به طوری که بهترین محل برای قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده، لایه میانی یعنی پوشش دارای آرایش نوع یک می باشد. در این حالت، ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب 40 درجه سلسیوس بهترین

کمتری را از خود نشان می دهد؛ 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 به صورت یک عایق حرارتی نامناسب در این لایه ایفای نقش می کند و بنابراین کمکی به بهبود شرایط آسایش حرارتی افراد نخواهد کرد.

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

در شکل های 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 شکل های 5، 9 و 10 مشاهده می شود که در شرایط حرارتی بحرانی سوزان، مناسب ترین آرایش برای قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در پوشش محافظ، آرایش نوع یک و بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده، دمایی حدود 40 درجه سلسیوس می باشد. بر این اساس، شکل 11 برای ایجاد امکان مقایسه بهتر میان نتایج ناشی از به کارگیری ماده تغییر فاز دهنده با دمای 40 درجه سلسیوس، به ازای سه آرایش مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که با نزدیک شدن لایه ماده تغییر فاز دهنده به محیط سوزان، عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در محافظت از بدن در مقابل آسیب های حرارتی تضعیف می شود. به بیان دیگر، زمان تحمل افراد دارای پوشش محافظ فاقد مواد تغییر فاز دهنده تحت شرایط گرمای سوزان حدود 300 ثانیه است. این در حالی است که با قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در لایه مجاور محیط سوزان (پوشش با آرایش نوع سه)، زمان تحمل افراد به حدود 450 ثانیه می رسد. این در حالی است که با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع دو، زمان تاب آوری حرارتی افراد به حداکثر 600 ثانیه و با پوشش محافظ با آرایش نوع یک، به حدود 900 ثانیه افزایش می یابد.

6- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در پوشش های محافظ آتش نشان ها بر زمان تاب آوری حرارتی تحت شرایط بحرانی گرمای

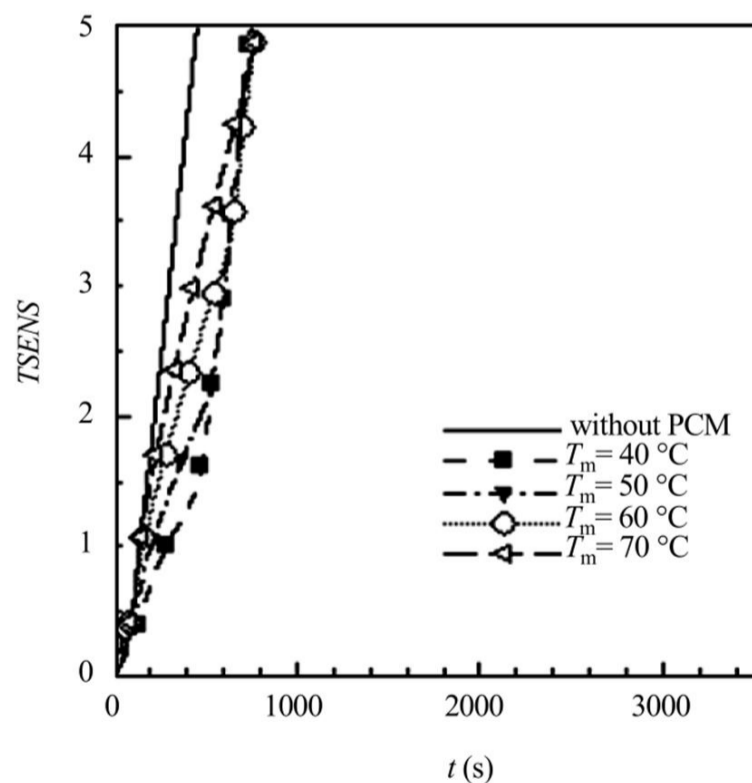


Fig. 9 Time variations of thermal sensation index under scorching conditions by using protective clothing with arrangement of Case 2

شکل ۹ تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط گرمای سوزان با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع دو

Sens محسوس
sk پوست

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.

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. Zsembinski, 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.

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 ² K)
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 ² kPa/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، (بی بعد)
η_{ev}	بازده تبخیری، (بی بعد)
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