



تأثیر استفاده از پوشش‌های محافظ دارای مواد تغییر فاز دهنده بر احساس حرارتی انسان تحت شرایط سرمای شدید

سید علیرضا ذوالفقاری^{۱*}، محمد فتحیان^۲ و محسن طالبی^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک و مدیر گروه پژوهشی انرژی در ساختمان و آسایش حرارتی، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۳ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹

چکیده

تأمین شرایط آسایش حرارتی انسان‌ها، به دلیل تأثیر آن بر بهره‌وری و سلامت افراد بسیار حائز اهمیت است. این امر می‌تواند در شرایط سرمای شدید و هنگامی بسیار چالش برانگیزتر باشد که بدن قادر نیست تا خود را از طریق سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم دما با محیط وفق دهد. در چنین شرایطی، یکی از راهکارهای مؤثر برای حفاظت از بدن افراد در مقابل آسیب‌های حرارتی، استفاده از پوشش‌های محافظ است. در این مطالعه، عملکرد پوشش محافظ دارای یک لایه ماده تغییر فاز دهنده، با استفاده از مدل‌سازی همزمان ساز و کارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن انسان در شرایط سرمای شدید، مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور، یک پوشش محافظ چند لایه به همراه ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده، عملکرد حرارتی آن به ازای دو آرایش مختلف برای لایه‌های لباس بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهترین موقعیت برای قرارگیری مواد تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ، لایه میانی لباس و بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فاز دهنده، حدود 10°C است؛ همچنین استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ، می‌تواند زمان محدوده احساس حرارتی مجاز افراد تحت شرایط سرمای شدید را از حدود ۴۰۰۰ ثانیه تا حدود ۶۰۰۰ ثانیه افزایش دهد.

کلمات کلیدی: پوشش‌های محافظ؛ مواد تغییر فاز دهنده؛ شرایط سرمای شدید؛ آسایش حرارتی.

Effect of Using Phase Change Materials in Protective Clothing on Human Thermal Comfort under Extreme Cold Conditions

S. A. Zolfaghari^{1,*}, M. Fathian², M. Talebi³

¹ Assistant Professor in Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

² M.Sc. in Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

³ PhD. candidate, Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

Providing the human thermal comfort, because of its impact on productivity and health is very important. This can be more challenging under extreme cold conditions and when the human body cannot adapt itself to the environment by using the physiological thermoregulatory mechanisms. Under these conditions, using protective clothing is one of the effective ways to protect the human body against the thermal injuries. In this study, the performance of protective clothing with a Phase Change Material (PCM) layer has been analysed by simultaneous modeling of physical and physiological mechanisms of the human under extreme cold conditions. For this purpose, multi-layer protective clothing with a PCM layer has been considered and its thermal performance has been investigated for two different arrangements of the layers. The results show that the middle layer of protective clothing is the best position for implementing the PCM layer and the best melting temperature for the mentioned PCM is about 10°C . Also, using the PCMs in protective clothing can increase the thermal tolerating time from 4000 seconds up to 6000 seconds under extreme cold conditions.

Keywords: Protective Clothing; Phase Change Materials; Extreme Cold Conditions; Thermal Comfort.

۱- مقدمه

فراهم نمودن شرایطی مطلوب به منظور تأمین آسایش حرارتی انسان‌ها در شرایط محیطی مختلف، مسأله‌ای مهم به حساب می‌آید. این موضوع به ویژه در شرایط بحرانی^۱ که بدن قادر نیست تا با استفاده از ساز و کارهای فیزیولوژیکی خود را با محیط وفق دهد، اهمیت مضاعفی پیدا می‌کند. یکی از این شرایط، شرایط بحرانی سرمای شدید است که در مشاغل خاص از جمله سردخانه‌های صنعتی و یا شرایط کوهنوردان در محیط‌های بسیار سرد و یا افرادی دیده می‌شود که در مناطق آب و هوایی بسیار سرد قطب شمال و نیمه قطبی زندگی می‌کنند. در این شرایط، دمای محیط به 30°C - می‌رسد و در صورت بیش از حد بودن اتلافات حرارتی و کاهش دمای بدن، می‌تواند باعث صدماتی از جمله، سرمازدگی و آسیب‌های حیاتی شود. در این شرایط بکارگیری راهکارهای موثر برای کاستن آسیب‌های حرارتی از جمله، استفاده از لباس‌هایی با عایق حرارتی بالا، طراحی المنت‌های الکتریکی درون لباس (چشمه حرارتی)، ساخت و طراحی یک سیستم گردش آب گرم درون لباس و به کارگیری مواد تغییر فاز دهنده (PCM)^۲ پیشنهاد می‌شود.

از جمله شیوه‌های نوین در زمینه طراحی پوشش‌های محافظ، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده 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 تغییر فاز دهنده، دارای توانایی تغییر حالت در محدوده دمایی عملکرد سیستم هستند. این مواد، انرژی را حین فرآیند تغییر فاز از جامد به مایع جذب می‌کنند و هنگام سرد شدن، طی یک فرآیند معکوس، انرژی جذب شده را به محیط باز می‌گردانند.

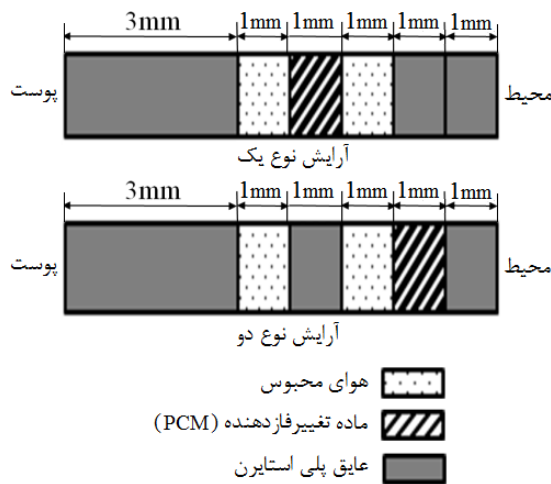
در سال‌های اخیر، بحث استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در منسوجات، بیش از پیش مورد توجه محققان و تولیدکنندگان لباس‌های محافظ قرار گرفته است. تاریخچه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لباس و تکنولوژی ترکیب میکروکپسول‌های دارای این مواد در ساختار منسوجات، به

برنامه‌های تحقیقاتی ناسا^۳ در اوایل دهه ۱۹۸۰ برمی‌گردد[۱]. 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 ۱۹۹۹، برای اولین بار تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در لباس‌های متداول به وسیله محققانی در دانشگاه ایالتی کانزاس، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت[۲]. یک سال بعد پاوز^۴[۳]، کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در منسوجات را به منظور بهبود عملکرد حرارتی آن‌ها به صورت آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار داد؛ همچنین با توجه به اینکه دمای هوا و باد دو عامل مهم آب و هوایی در تعیین تلفات حرارتی از انسان در محیط‌های سرد هستند، مطالعات متعددی از جمله نیلسون^۵ و همکاران[۴]، در سال ۲۰۰۰ نشان داده‌اند که ارزش پوشش محافظ می‌تواند بطور قابل توجهی تأثیرات باد را بر انسان کاهش دهد. هولمر^۶ و همکاران[۵] در سال ۲۰۰۱، اثر سرعت‌های مختلف باد بر عملکرد پوشش‌های محافظ با ترکیبات متفاوت را روی یک مانکن حرارتی، مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که چگونگی قرارگیری ترکیب لایه‌های پوشش در نفوذپذیری باد موثر بوده، می‌توان با چیدمان مناسب لایه‌های لباس، از تلفات حرارتی بدن انسان جلوگیری نمود. در سال ۲۰۰۲ هی^۷ و ستروال^۸[۶]، ایده استفاده از زل‌های پارافینی را به عنوان مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره انرژی در پوشش‌های مورد استفاده در سرما مطرح کردند. هریت^۹ و همکاران[۷] در سال ۲۰۰۴، اثر تبخیر عرق بر خواص حرارتی پوشش‌های محافظ در برابر سرما را به ازای چهار گروه پوشش محافظ مختلف در شرایط دمایی بین 0°C تا 50°C مورد مطالعه قرار دادند. همچنین وانگ^{۱۰} و همکاران[۸] در سال ۲۰۰۸، به مطالعه تأثیر رطوبت بر عملکرد پوشش‌های محافظ سرما بصورت تجربی پرداختند.

³ NASA⁴ Pause⁵ Nilsson⁶ Holmer⁷ He⁸ Setterwall⁹ Harriet¹⁰ Wang¹ Critical Conditions² Phase Change Materials

جدول ۱- مشخصات لایه‌های لباس مورد بررسی در تحقیق

| حاضر [۹] | | | |
|----------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| نام ماده | چگالی (kg/m ³) | هدایت حرارتی (W/mK) | گرمای ویژه (J/kg°C) |
| عایق پلی استایرن | ۷۲ | ۰/۰۳۸ | ۷۰۰ |
| ماده تغییر فاز دهنده | ۱۰۰۰ | ۰/۳۱۰ | ۲۰۰۰ |
| هوای محبوس | ۱/۱۶ | ۰/۰۲۶ | ۱ |



شکل ۱- دو آرایش مختلف برای نحوه قرارگیری لایه حاوی ماده تغییر فاز دهنده در لباس محافظ

به منظور ارزیابی عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در لباس، از یک PCM با خواص حرارتی متوسط‌گیری شده از میان مواد تغییر فاز دهنده رایج در تحقیقات گذشته [۱۱ و ۱۲] با گرمای نهان ذوب ۱۸۰ kJ/kgK استفاده شده است.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- انتقال حرارت در لباس

از آنجایی که گرادین دما در جهت ضخامت لباس در مقایسه با سایر جهت‌ها غالب است، معادله انتقال حرارت گذرا در لایه‌های مختلف لباس، به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

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

در این رابطه، T دما ($^{\circ}C$)، x جهت انتقال حرارت (m)، t زمان (s)، k رسانش گرمایی (W/m^2C)، ρ چگالی (kg/m^3)، \dot{q}_{gen} نرخ تولید حرارت (W/m^3) و $C_{p,eff}$ بیانگر ظرفیت گرمایی مؤثر برای هر لایه از لباس است. قابل ذکر

با توجه به پیشینه مطالعات ذکر شده در این زمینه، مشاهده می‌شود که بیشتر تحقیقات از نوع آزمایشگاهی بوده، در آنها اثرات همزمان لباس و سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن، مورد مطالعه قرار نگرفته است؛ همچنین مطالعه جامعی درباره تأثیر ترکیب اجزا و بخش‌های مختلف لباس‌های محافظ صورت نپذیرفته و 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 پوشش‌های محافظ در تامین آسایش حرارتی در شرایط بحرانی، در این مطالعه به مدل‌سازی همزمان تأثیر استفاده از مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد پوشش‌های محافظ به همراه سازوکارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن انسان تحت شرایط بحرانی سرمای شدید پرداخته شده است.

۲- فضای نمونه و روند حل مسأله

در این مطالعه، با استفاده از کد نویسی عددی به روش تفاضل محدود به شبیه‌سازی و تحلیل اثرات جانمایی ماده تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ و تأثیر آن بر زمان تاب‌آوری افراد در برابر شرایط بحرانی سرمای شدید برای دو آرایش مختلف چیدمان لایه‌های لباس (مطابق با شکل ۱) پرداخته شده است؛ همچنین، مشخصات مربوط به لایه‌های این لباس طبق اطلاعات مرجع [۹]، در جدول ۱ ارائه شده است. این مدل‌سازی شامل، حل همزمان معادلات انتقال حرارت یک بعدی گذرا در لایه‌های لباس با قابلیت قرارگیری عایق‌های گرمایی و مواد تغییر فاز دهنده به همراه معادلات مربوط به سازوکارهای فیزیکی و فیزیولوژیکی بدن، برای تعیین احساس حرارتی و زمان تاب‌آوری افراد در شرایط بحرانی سرمای شدید است. در این مدل‌سازی، از مدل آسایش حرارتی گذرای گایج^۱ [۱۰]، 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 سرد (دمای محیط $^{\circ}C -30$) در نظر گرفته شده است. ضمناً دمای اولیه پوشش محافظ $^{\circ}C 30$ است؛ همچنین

^۱ Gagge

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

که h_c ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی سطح لباس (W/m^2K)، σ ثابت استفان بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2k^4$)، ε ضریب صدور سطح لباس (بی‌بعد) و $T_{cl,o}$ ، T_{air} به ترتیب، دمای هوا، دمای مرز خارجی لباس ($^{\circ}C$) است. با توجه به اینکه در این مطالعه از مقاومت حرارتی میان بدن و لباس صرف‌نظر شده است، شرط مرزی سمت داخلی لباس، مطابق با رابطه (۴) و بر مبنای دمای سطح پوست تعیین می‌شود:

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

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.

۳-۲- عوامل فیزیکی مؤثر بر موازنه‌ی انرژی بدن

بدن انسان را می‌توان همانند 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 می‌شود؛ همچنین، در صورتی که بدن نتواند همه حرارت غیر قابل مصرف را با محیط تبادل کند، بخش باقیمانده این انرژی حرارتی در بدن ذخیره (S) می‌شود؛ بنابراین می‌توان معادله موازنه انرژی برای بدن را به صورت رابطه (۵) و بر حسب وات بر متر مربع سطح بدن نوشت [۱۶]:

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

همچنین، تبادل حرارت از طریق پوست را می‌توان به دو بخش محسوس ($Q_{sens,sk}$) و تبخیری ($Q_{ev,sk}$)، مطابق رابطه (۶) 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 مطابق رابطه (۷) خواهیم داشت:

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

است که رابطه (۱)، هم برای شبیه‌سازی رفتار لایه‌های جامد و هم لایه‌های مواد تغییر فاز دهنده کاربرد دارد. بر این اساس، مقدار $C_{p,eff}$ برای لایه‌های جامد مقداری ثابت و مشخص دارد؛ اما مقدار آن برای مواد تغییر فاز دهنده با پیچیدگی بیشتری مواجه است. به طوری 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 کرده 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 هنگام تغییر فاز، 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^۱ [۱۳] است. بر این اساس، می‌توان ظرفیت گرمایی مؤثر برای مواد تغییر فاز دهنده را به شکل رابطه (۲) تعریف کرد [۱۴]:

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

که در آن C_{p0} ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد، L_f گرمای نهان ذوب و T_m متوسط دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده است؛ همچنین، β بیانگر انحراف از معیار تابع توزیع نرمال گوس است و در رابطه (۲)، به بازه دمایی ذوب (محدوده خمیری شدن) ماده تغییر فاز دهنده مربوط می‌شود. با بررسی خواص حرارتی مربوط به مواد تغییر فاز دهنده متداول در کاربردهای مربوط به منسوجات و پوشش‌های محافظ [۱۵]، محدوده دمایی تغییر فاز ماده از حالت جامد به مایع در حدود $1^{\circ}C$ برآورد شد و در نتیجه در این شرایط، مقدار پارامتر β ، حدود 0.16 است. با جایگذاری ظرفیت گرمایی اصلاح شده در رابطه (۱)، معادله انتقال حرارت یک بعدی برای مواد تغییر فاز دهنده به دست می‌آید؛ همچنین، شرایط مرزی در سمت خارجی لباس با در نظر گرفتن سازوکارهای انتقال حرارت جابه‌جایی و تابش، مطابق با رابطه (۳) منظور شده است:

^۱ Gauss

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

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

همانطور که گفته شد، یکی از سازوکارهای تنظیم حرارت بدن، اتساع و انقباض رگها است. این سازوکار باعث می شود 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 می شود که خون کمتری به پوست برسد و حرارت بدن کمتر تلف شود. بر این اساس، سازوکار اتساع و انقباض عروق، باعث می شود که نرخ شارش خون در بخش پوست تغییر کرده، در نتیجه کسر جرمی بخش پوست متأثر شود. رابطه (۱۴) ارتباط میان کسر جرمی بخش پوست (λ) با دبی جرمی شارش خون (\dot{m}_{bl}) را نشان می دهد:

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

در آن \dot{m}_{bl} دبی شارش خون میان پوست و مرکز بدن ($\text{kg/m}^2\text{s}$) بوده، در شرایط سرما به صورت رابطه (۱۵) نوشته می شود [۱۷]:

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

یکی دیگر از سازوکارهای فیزیولوژیکی کنترل دمای بدن، افزایش نرخ متابولیک در اثر لرز است که از فرآیندهای فیزیولوژیکی مهم برای تنظیم دمای بدن در شرایط سرد محسوب می شود. در واقع، نرخ متابولیک میزان حرارت تولید شده در بدن به ازای واحد سطح خارجی بدن است که مطابق رابطه (۱۶)، بخشی از آن به میزان فعالیت جسمانی (M_{act}) و بخش دیگر آن به لرزیدن ماهیچهها به عنوان پاسخ بدن به سرما (M_{shiv}) مربوط است.

$$M_{shiv} + M_{act} = M \quad (16)$$

سیگنالهای سرد پوست و مرکز بدن، موجب انقباض ماهیچهها شده و از این طریق بر میزان متابولیک بدن می افزایند. افزایش نرخ متابولیک بدن در اثر لرز، از رابطه تجربی (۱۷) قابل محاسبه است [۱۷]:

$$M_{shiv} = 19.4 \text{CSIG}_{sk} \text{CSIG}_{cr} \quad (17)$$

۳-۴- مدل ناپایای گایج

یکی از وجوه تمایز تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین، عدم ثابت بودن شرایط مرزی در مرز داخلی لباس و سمت بدن

در آن k رسانش گرمایی (W/mK) برای لایه‌ای از لباس است که در تماس با بدن است؛ همچنین، میزان انتقال حرارت ناشی از تبخیر از سطح پوست به کمک رابطه (۸)، قابل محاسبه است [۱۷]:

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

که w تری پوست^۱ (بی بعد) است و به صورت کسری از سطح پوست بدن تعریف می شود که از آب پوشیده شده است؛ همچنین، $P_{sk,sat}$ فشار بخار اشباع روی سطح پوست (kPa)، P_{air} فشار بخار هوا (kPa) و R_{et} میزان مقاومت تبخیری لباس ($\text{m}^2\text{kPa/W}$) است. شایان ذکر است که مقاومت حرارتی لباس، به میزان تراوایی لایه‌های لباس و نفوذپذیری جرمی آن وابسته است.

ضمن اینکه اتلافات حرارتی ناشی از تنفس را می توان با استفاده از رابطه (۹) محاسبه کرد [۱۷]:

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

۳-۳- عوامل فیزیولوژیکی تنظیم حرارت بدن

بدن انسان جهت کنترل اتلافات حرارتی، از یک سری سازوکارهای فیزیولوژیکی استفاده می کند که اصطلاحاً سازوکارهای تنظیم حرارت بدن نامیده می شود. این سازوکارها که از طریق سیگنالهای فرستاده شده توسط حسگرهای دمایی بدن عمل می کنند، عبارتند از: تعرق تنظیمی، افزایش متابولیک ناشی از لرز و اتساع و انقباض رگها. شایان ذکر است که قدرت سیگنالهای حرارتی بدن، به میزان اختلاف دمای پوست یا مرکز بدن با دمای حالت خنثی برای این بخشها بستگی دارد. بر این اساس سیگنالهای حرارتی برای بخشهای مرکزی و پوست به ترتیب به صورت، روابط (۱۰) و (۱۱) تعریف می شوند:

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

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

که CSIG_{sk} و CSIG_{cr} به ترتیب بیانگر، سیگنالهای سرمایی مربوط به بخش پوست و بخش مرکزی بدن (بی بعد) هستند. همچنین، دمای حالت خنثی برای پوست ($T_{sk,n}$) و مرکز بدن ($T_{cr,n}$)، به مقدار روابط (۱۲) و (۱۳) می باشند:

¹ Skin Wettedness

$$TSENS = \begin{cases} 0.4685(T_b - T_{b,c}), & T_b < T_{b,c} \\ 4.7\eta_{ev} \left(\frac{T_b - T_{b,c}}{T_{b,h} - T_{b,c}} \right), & T_{b,c} < T_b < T_{b,h} \\ 4.7\eta_{ev} + 0.685(T_b - T_{b,h}), & T_b > T_{b,h} \end{cases} \quad (21)$$

که در این رابطه η_{ev} بازده تبخیری (بی‌بعد) است و استاندارد آسایش حرارتی اشری^[۱۸]، مقدار تقریبی ۰/۸۵ را برای آن پیشنهاد می‌دهد؛ همچنین مقادیر $T_{b,c}$ و $T_{b,h}$ از روابط (۲۲) و (۲۳) قابل محاسبه می‌باشند:

$$T_{b,c} = 0.0033(M-W) + 36.30 \quad (22)$$

$$T_{b,h} = 0.0060(M-W) + 36.67 \quad (23)$$

شاخص TSENS، بیانگر احساس حرارتی افراد است و مطابق با مقیاس احساس حرارتی اشری با عددی بین ۵- و ۵+ نشان داده می‌شود؛ به طوری که هر عدد صحیح بین این مقادیر، به این صورت به احساس حرارتی افراد مرتبط می‌شود: ۵+ گرمای غیر قابل تحمل، ۴+ خیلی داغ، ۳+ داغ، ۲+ گرم، ۱+ کمی گرم، ۰ خنثی، ۱- کمی خنک، ۲- خنک، ۳- سرد، ۴- خیلی سرد، ۵- سرمای غیر قابل تحمل.

در نهایت الگوریتم حل عددی مدل گایج و معادلات لباس حاوی ماده تغییر فاز دهنده، برای برآورد احساس حرارتی افراد در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده، نتایج تحقیق حاضر با نتایج مراجع [۱۹ و ۱۵] مورد مقایسه قرار گرفته است. بر این اساس، ابتدا نتایج مدل‌سازی مربوط به ذوب یک ماده تغییر فاز دهنده با نتایج عددی و تجربی تیان^۴ و ژائو^۵ [۱۹] مقایسه شده است. شکل ۳، مقایسه تغییرات دما بر حسب زمان در ضخامت ۰/۰۰۸ متری را با گذشت زمان نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که نتایج تحقیق حاضر نسبت به نتایج تجربی و عددی تیان و ژائو [۱۹]، از دقت قابل قبولی برخوردار است.

است. به طوری که در تحقیق حاضر، یک تعامل پویا میان بدن-لباس-محیط مورد مدلسازی قرار می‌گیرد. بر این اساس، شرایط مرزی سمت بدن، بر مبنای 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 به منظور مدلسازی شرایط حرارتی بدن به صورت پویا و وابسته به زمان استفاده شده است. در سال ۱۹۸۶، گایج مدل دونقطه‌ای^۱ خود را ارائه کرد. مدل وی بر اساس معادله موازنه انرژی بدن در شرایط گذرا توسعه یافته است. در این مدل، بدن به صورت دو استوانه هم محور مدل می‌شود که استوانه داخلی، نماینده اعضای مرکزی بدن و استوانه خارجی، نشانگر پوست بدن است. با تلفیق معادلات انتقال حرارت مواد تغییر فاز دهنده و معادلات اصلی مدل گایج، معادلات موازنه انرژی برای پوست و بخش مرکزی بدن به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) نوشته می‌شود:

$$\frac{\lambda m_b C_{p,b}}{A_D} \frac{dT_{sk}}{dt} = Q_{cr,sk} - (Q_{sens,sk} + Q_{ev,sk}) \quad (18)$$

$$\frac{(1-\lambda)m_b C_{p,b}}{A_D} \frac{dT_{cr}}{dt} = M - W - Q_{res} - Q_{cr,sk} \quad (19)$$

m_b جرم بدن (kg)، $C_{p,b}$ ظرفیت گرمایی بدن (J/kg.K)، T_{sk} دمای مرکز بدن (°C)، T_{cr} دمای پوست (°C)، t زمان (s) و λ کسر جرمی پوست (بی‌بعد) است [۱۷]؛ همچنین، $Q_{cr,sk}$ میزان تبادل حرارت میان پوست و مرکز بدن است و به وسیله رابطه (۲۰) قابل محاسبه است [۱۷].

$$Q_{cr,sk} = (K_{eff} + \dot{m}_{bl} C_{p,bl})(T_{cr} - T_{sk}) \quad (20)$$

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

بر اساس 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 رابطه تجربی و به صورت شاخص TSENS^۲ برآورد می‌کند که در رابطه (۲۱) نشان داده شده است [۱۷].

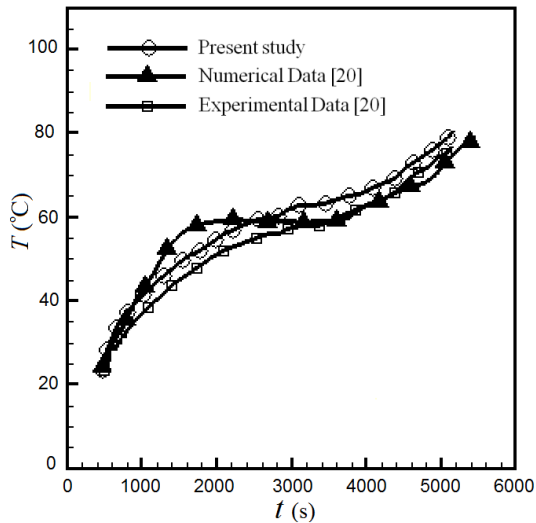
^۲ ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

^۴ Tian

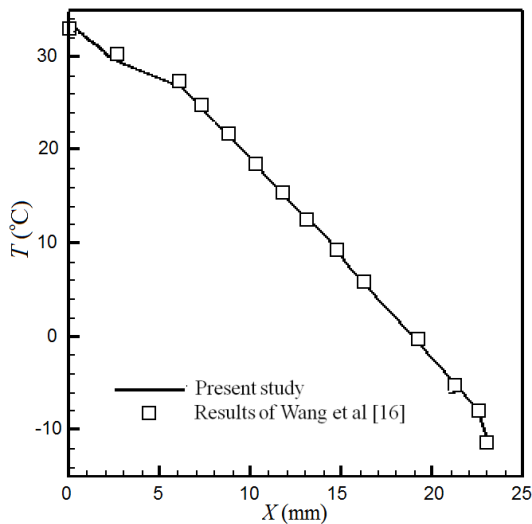
^۵ Zhao

^۱ Two-node

^۲ Thermal Sensation (TSENS)



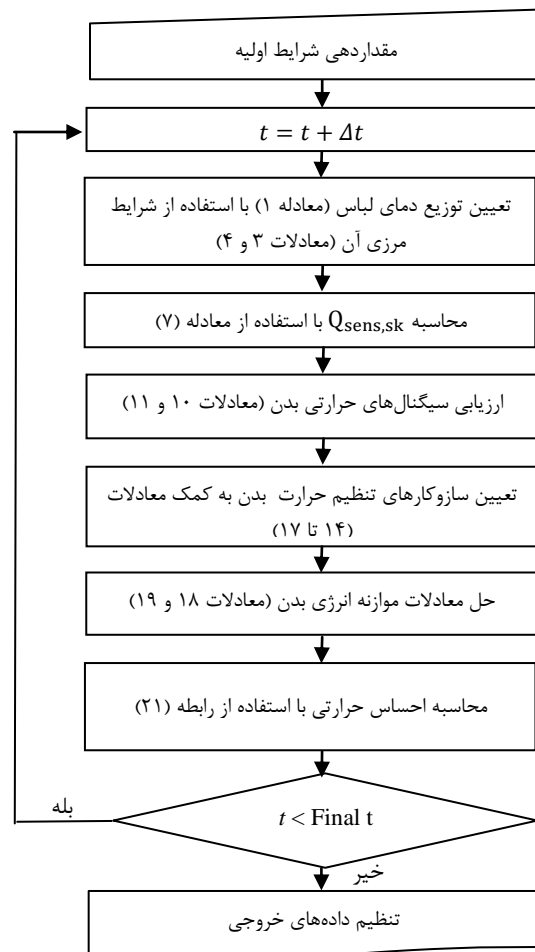
شکل ۳- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج عددی و تجربی تیان و ژائو [۱۹]



شکل ۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج وانگ و همکاران [۱۵]

انتخاب دمای ذوب مناسب برای ماده تغییر فازدهنده، قرارگیری شاخص احساس حرارتی افراد در محدوده قابل تحمل برای بدن است؛ به طوری که پوشش محافظ باید این توانایی را داشته باشد، تا مدت زمان بیشتری فرد را در محدوده احساس حرارتی مناسب 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

همچنین، در شکل ۴ عملکرد پوشش‌های محافظ دارای مواد تغییر فازدهنده میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج وانگ و همکاران [۱۵]، مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع دمای بدست آمده در لباس بر حسب ضخامت آن، با نتایج وانگ و همکاران نیز فقط با 0.5°C اختلاف دما، تطابق بسیار خوبی دارد.

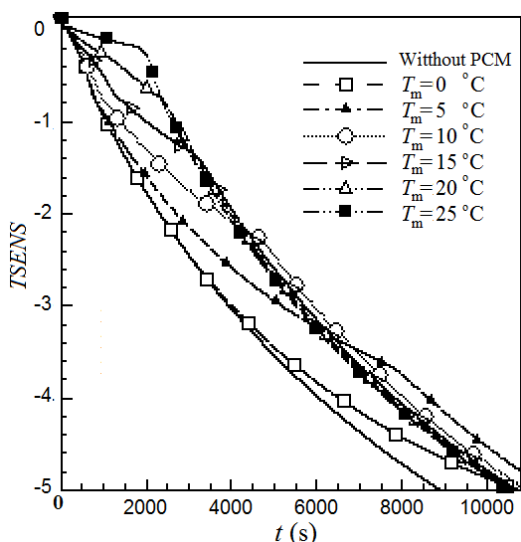


شکل ۲- طرح‌واره روند محاسبات در تحقیق حاضر

۵- نتایج و بحث

در این تحقیق سعی شده است تا با تغییر آرایش قرارگیری ماده تغییر فازدهنده در پوشش محافظ تحت شرایط سرمای شدید، بهترین دمای ذوب برای ماده تغییر فازدهنده متناسب با شرایط دمایی و چیدمان لایه‌های لباس تعیین شود. معیار

نکته قابل توجه این است که در شرایط سرما، سازوکار انقباض رگ‌ها باعث می‌شود که کسر جرمی پوست تغییر کند و با کاهش دما و در سرمای شدید، کسر جرمی پوست به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. در شکل‌های ۶ و ۷، میزان فرآیند لرز در بدن و کسر جرمی پوست تحت شرایط سرمای شدید نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تا زمان تقریباً ۵۰۰ ثانیه سازوکارهای لرز و انقباض عروق جانبی کارساز هستند؛ ولی از این زمان به بعد ماده تغییر فاز دهنده باید وارد عمل شود و با انجماد و استفاده از گرمای نهان خود این روند کاهش احساس سرمای را آهسته‌تر کند. به همین علت ماده تغییر فاز دهنده‌ای که از این زمان به بعد منجمد می‌شود، مناسب‌تر است. بر این اساس طبق شکل ۸، PCM دارای دمای ذوب 10°C این ویژگی را دارد. البته قابل ذکر است که از این زمان به بعد سازوکارهای فیزیولوژیکی بدن نیز به کار خود ادامه می‌دهد، ولی کارایی چندانی ندارند. شکل ۸ به منظور توجیه رفتار فیزیکی ماده تغییر فاز دهنده در محافظت حرارتی از بدن در شرایط سرمای شدید، نمودار پیشروی انجماد این مواد برحسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، زمان منجمد شدن ماده تغییر فاز دهنده با کاهش دمای انجماد آن افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط سرمای شدید با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع یک

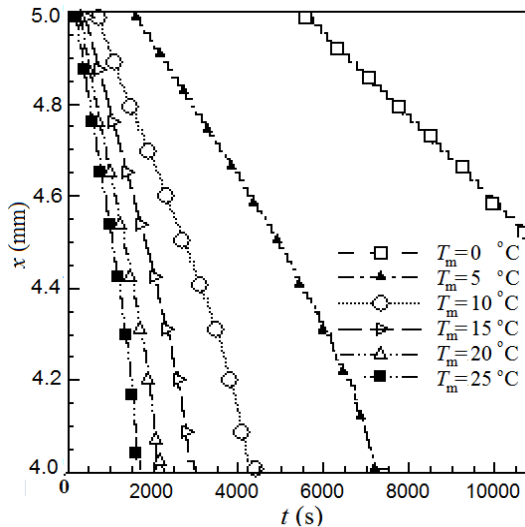
محدوده، یعنی به ازای شاخص احساس حرارتی بالاتر از ۳ و پایین‌تر از ۳- فرد دچار آسیب حرارتی می‌شود. از آنجایی که هدف، افزایش سطح تحمل افراد در شرایط دمایی بحرانی است؛ بنابراین در تحقیق حاضر، عدد ۳- به عنوان حد شاخص احساس حرارتی برای شرایط سرمای شدید در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که این شاخص بیانگر، کمینه احساس حرارتی افراد در شرایطی است که بدن هنوز در معرض آسیب ناشی از سرما قرار نگرفته است. در ادامه، نتایج مربوط به شاخص احساس افراد تحت شرایط سرمای شدید به ازای دو آرایش مختلف برای لایه‌های پوشش محافظ ارائه می‌شود.

۵-۱- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در پوشش محافظ با آرایش نوع یک

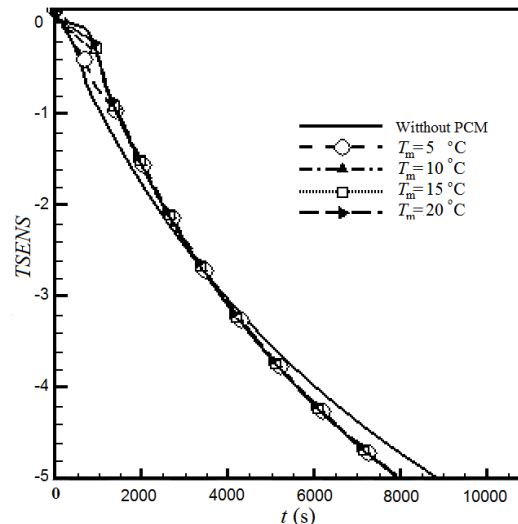
در این بخش نمودارهای مربوط به شاخص احساس حرارتی فرد، سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم دمای بدن (میزان فرآیند لرز در بدن و کسر جرمی پوست) و میزان پیشروی انجماد ماده تغییر فاز دهنده برای پوشش محافظ با آرایش نوع یک در شرایط سرمای شدید، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل ۵، تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی افراد دارای پوشش محافظ نوع یک، تحت شرایط سرمای شدید به ازای ۶ دمای ذوب مختلف برای ماده تغییر فاز دهنده نشان داده شده است. مطابق شکل در این آرایش، با وجود اینکه با تغییر دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده، در مدت زمان تحمل فرد (مدت زمانی که شاخص TSENS بالاتر از ۳- است) تفاوت چندانی دیده نمی‌شود؛ اما مدت زمان محدوده احساس حرارتی مجاز در حالت به کارگیری ماده تغییر فاز دهنده نسبت به حالت عدم استفاده از PCM بیشتر می‌شود؛ همچنین در این میان PCM دارای دمای ذوب 10°C نسبت به PCM‌های دیگر بدن را در احساس حرارتی مطلوب‌تر حفظ می‌کند؛ لذا این ماده تغییر فاز دهنده نسبت به بقیه مناسب‌تر است و فرد را به مدت زمان حدود ۶۰۰۰ ثانیه در محدوده احساس حرارتی مجاز نگه می‌دارد؛ در حالی که مدت زمان محدوده آسایش حرارتی مجاز بدون استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، حدود ۴۰۰۰ ثانیه است.

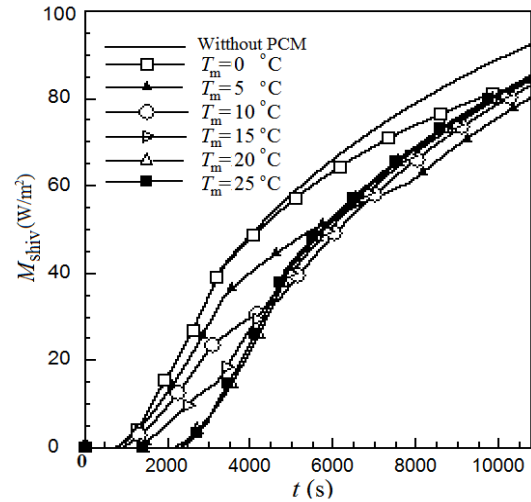
احساس حرارتی مطلوب فرد در زمان‌های اولیه قرار گرفتن در معرض محیط تأثیر خواهد داشت. بر این اساس به نظر می‌رسد که قرارگیری PCM در لایه‌های نزدیک به محیط، چندان مناسب نیست؛ همچنین شکل ۱۰، جهت مقایسه بهتر میان نتایج ناشی از بکارگیری ماده تغییر فازدهنده با دمای 10°C ، به ازای دو آرایش مختلف ارائه شده است.



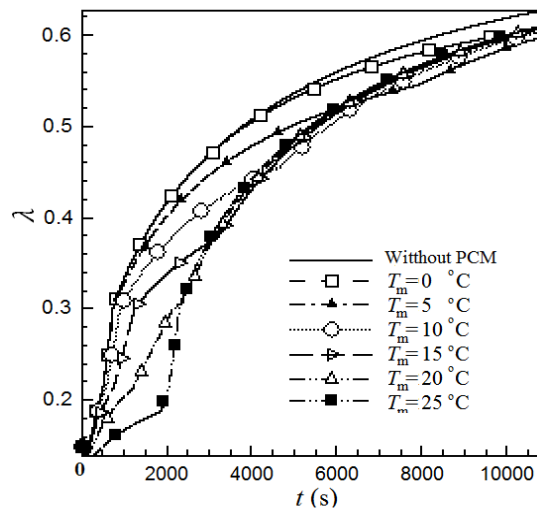
شکل ۸- تغییرات زمانی محل قرارگیری بیشانی انجماد ماده تغییر فازدهنده در پوشش محافظ با آرایش نوع یک



شکل ۹- تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی تحت شرایط سرمای شدید با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع دو



شکل ۶- میزان فرآیند لرز در بدن تحت شرایط سرمای شدید با استفاده از پوشش محافظ با آرایش نوع یک



شکل ۷- تغییرات زمانی کسر جرمی پوست به ازای تغییر دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده در پوشش محافظ نوع یک

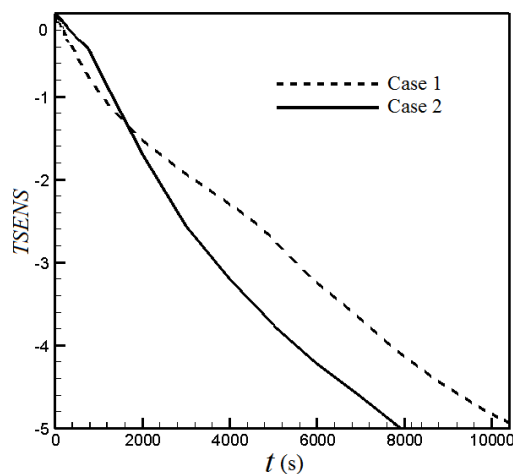
۲-۵- استفاده از ماده تغییر فازدهنده در پوشش محافظ با آرایش نوع دو

در شکل ۹، تغییرات زمانی شاخص احساس حرارتی افراد دارای پوشش محافظ با آرایش نوع دو، تحت شرایط سرمای شدید به ازای تغییر دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که کاربرد PCM در لباس محافظ با آرایش نوع دو تأثیر چندانی در افزایش زمان تحمل افراد ندارد و مشاهده می‌شود که استفاده از آن فقط روی

حدود ۴۰۰۰ ثانیه به ۶۰۰۰ ثانیه می‌رساند. همین امر نشان دهنده، عملکرد مناسب پوشش‌های محافظ دارای مواد تغییر فاز دهنده در شرایط بحرانی سرمای شدید است.

۷- فهرست علائم

| | |
|---|-----------------|
| ظرفیت گرمایی، J/kgK | C_p |
| سیگنال سرمایی، بی بعد | CSIG |
| ضریب هدایت حرارتی، W/mK | k |
| رسانش مؤثر میان پوست و مرکز بدن، W/m ² K | K_{eff} |
| گرمای نهان ذوب، kJ/kg | L_f |
| جرم بدن، kg | m |
| نرخ متابولیک، W/m ² | M |
| فشار جزئی بخار، kPa | p |
| نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح بدن، W/m ² | Q |
| نرخ تولید حرارتی حجمی، W/m ³ | \dot{q}_{gen} |
| مقاومت حرارتی تبخیری کل لباس، m ² kPa/W | R_{et} |
| دما، °C | T |
| زمان، s | t |
| تری پوست، بی بعد | w |
| نرخ کار، W/m ² | W |
| علائم یونانی | |
| کسر جرمی پوست، بی بعد | λ |
| بازده تبخیری، بی بعد | η_{ev} |
| چگالی، kg/m ³ | ρ |
| زیرنویس‌ها | |
| مربوط به بدن | b |
| مربوط به خون | bl |
| مرز داخلی لباس | cl, i |
| مرز خارجی لباس | cl, o |
| مرکز بدن | cr |
| تبخیری | ev |
| ذوب | m |
| خنثی | n |
| تنفسی | res |
| تعرق تنظیمی | rsw |
| اشباع | sat |
| محسوس | sens |
| پوست | sk |



شکل ۱۰- مقایسه شاخص احساس حرارتی در صورت بکارگیری دو آرایش مختلف برای پوشش‌های محافظ دارای ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب ۱۰°C

نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی سرمای شدید، با نزدیک شدن لایه ماده تغییر فاز دهنده به محیط سرمای شدید، عملکرد ماده تغییر فاز دهنده در محافظت از بدن در مقابل آسیب‌های حرارتی تضعیف می‌شود. به عبارتی PCM مناسب برای قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در پوشش محافظ، دارای آرایش نوع یک و بهترین دمای ذوب برای آن، ۱۰°C است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی تاثیر بکارگیری مواد تغییر فاز دهنده در پوشش‌های محافظ تحت شرایط بحرانی سرمای شدید پرداخته شد. با توجه به تحلیل نتایج نشان داده شد که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده با آرایش و دمای ذوب مناسب در پوشش‌های محافظ، می‌تواند تا حد چشمگیری بر میزان افزایش زمان احساس حرارتی فرد تحت شرایط سرمای شدید تأثیرگذار باشد؛ به طوری که محل مناسب برای قرار گرفتن ماده تغییر فاز دهنده پوشش دارای آرایش نوع یک، یعنی بکارگیری ماده تغییر فاز دهنده، در لایه میانی پوشش محافظ است. در این حالت، ماده تغییر فاز دهنده با دمای ذوب ۱۰°C، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد و زمان تحمل افراد تحت شرایط بحرانی سرمای شدید تا ۱/۵ برابر نسبت به حالت بدون ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌دهد و این زمان را از

۸- مراجع

- [10] Gagge AP, Stolwijk JAJ, Nishi Y (1971) An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans* 77:247-262.
- [11] Wang SX, Li Y, Hu JY, Hiromi T, Song QW (2006) Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing. *Polym Test* 25: 580-587.
- [12] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, Gracia A, Fernandez AI (2011) Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings, A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 15: 1675-1695.
- [13] Halford CK, Boehm RF (2007) Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy Build* 39: 298-305.
- [۱۴] [صلحی م (۱۳۹۲)] تحلیل عملکرد حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به عنوان عایق در جدار خارجی ساختمان. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند، بیرجند.
- [15] Wang SX, Li Y, Hu JY, Hiromi T, Song QW (2006) Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing. *Polym Test* 25: 580-587.
- [16] Morgan D, Baskett R (1974) Comfort of man in the city. An energy balance model of man – environment coupling. *Int J Biometeorol* 18(3): 184-198.
- [۱۷] [معرفت م، امیدوار ا (۱۳۸۷)] آسایش حرارتی. انتشارات کلید آموزش، تهران.
- [18] ASHRAE (2001) *Handbook-fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- [19] Tian Y, Zhao CY (2011) A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals. *Energy* 36: 5539-5546.
- [1] Mondal S (2008) Phase change materials for smart textiles–An overview. *Appl Therm Eng* 28(11-12): 1536-1550.
- [2] Shim H (2001) The use of phase change materials in clothing. *Text Res J* 71(6): 495-502.
- [3] Pause B (2000) Textiles with improved thermal capabilities through the application of phase change material (PCM) microcapsules. *Melliand Text* 81(9): 753-754.
- [4] Nilsson HO, Anttonen H, Holm R (2000) New algorithms for prediction of wind effects on cold protective clothing. *Proceedings of NOKOBETEF 6, 1 st ECPC, Norra Latin, Stockholm, Sweden* pp. 17-20.
- [5] Holmer I, Nilsson HO, Anttonen H (2001) Prediction of wind effects on cold protective clothing. *RTO HFM Symposium on "Blowing Hot and Cold: Protecting Against Climatic Extremes"* MP-076.
- [6] He B, Setterwall F (2002) Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage and cool storage systems capital cost estimation. *Energy Convers Manage* 43(13): 1709-1723.
- [7] Harriet M, Mari H (2004) The influence of sweating on the heat transmission properties of cold protective clothing studied with a sweating thermal manikin. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* 10(3): 263-269.
- [8] Wang SX, Li Y, Tokura H, Hu JY, Han YX, Kwok YL, Au RW (2008) Effect of moisture management on functional performance of cold protective clothing. *Text Res J* 77(12): 968-980.
- [9] Lawson R, Mell E (2010) A heat transfer model for firefighter's protective clothing, continued development in protective clothing modeling. *Fire Technol* 46: 833-841.