

## تحلیل پارامترهای موثر بر آسایش حرارتی با مدلسازی انتقال حرارت و رطوبت از لباس

در اکثر مدل‌های حرارتی بدن انسان فرض می‌شود کلیه تعرق روی سطح پوست تبخیر شده و تاثیر لباس در نرخ تبخیر بواسطه جذب عرق لحاظ نمی‌گردد. در این مقاله کمیت‌های موثر بر آسایش حرارتی با مدلسازی مکانیزم‌های موثر بر انتقال حرارت و جرم از لباس بخصوص تبخیر درون لباس مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. در بخش اول نتایج اثرات پارامترهای فیزیکی و ساختاری اصلی لباس بر نرخ تبخیر و تری لباس مورد حل و بحث قرار گرفته است، نتایج نشان می‌دهد که این پارامترها تاثیر قابل توجهی بر عملکرد تبخیری لباس خواهند داشت. در بخش دوم معیارهای آسایش حرارتی انسان مورد تحلیل قرار گرفته است، نتایج بیانگر آن است که این کمیت‌ها ارتباط بسزایی با شرایط محیطی و نوع لباس خواهند داشت.

عماد پاسدار<sup>۱</sup>

کارشناس ارشد

مهدی معرفت<sup>۲</sup>

دانشیار

سیدعلیرضا ذوالفقاری<sup>۳</sup>

استادیار

واژه‌های راهنما: انتقال حرارت و رطوبت، لباس، محیط متخلخل، تبخیر و تری لباس، آسایش حرارتی

### ۱- مقدمه

مدلسازی احساس حرارتی افراد در مقابل تغییر عوامل محیطی، به لحاظ کاربردهایی که در زمینه معماری، طراحی سیستم‌های سرمایش و گرمایش، صنایع هوافضا، علوم پزشکی و ... دارد، موضوعی است که سالها مورد توجه محققان بوده است. در چند دهه اخیر، مدل‌های بسیاری در زمینه مدلسازی آسایش حرارتی ارائه شده است که هر یک از قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی برخوردارند [۱]. اغلب مدل‌های موجود برای پیش‌بینی شرایط حرارتی بدن، بر پایه معادله بالانس انرژی برای بدن استوار هستند. بطوریکه این مدل‌ها بدن را به بخش‌ها و لایه‌های مختلف تقسیم نموده و با نوشتن معادله بالانس انرژی و محاسبه دما برای هر بخش و لایه، شرایط حرارتی بدن را ارزیابی می‌کنند. در میان مدل‌های موجود برای پیش‌بینی آسایش حرارتی ساکنان می‌توان به مدل فنر [۲] به عنوان معروف‌ترین مدل پایا و مدل گایج [۳] به عنوان شناخته‌شده‌ترین مدل ناپایا اشاره نمود. شایان ذکر است که دو مدل مذکور از رویکرد نسبتاً ساده‌ای برای ارزیابی شرایط حرارتی بدن استفاده می‌کنند و به دلیل همین سادگی، در استانداردهای اشری [۴] و ایزو [۵] مورد استناد

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس emadpasdar@yahoo.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسؤل، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس maerefat@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند alireza.zolfaghari@yahoo.com

قرار گرفته‌اند. در این مدلها، لباس بصورت بسیار ساده و به شکل پوششی یکنواخت بر روی تمام سطح پوست مدلسازی شده است. این در حالی است که در شرایط واقعی، بخشی از سطح بدن پوشیده و بخش دیگر فاقد پوشش است. به منظور رفع این نقیصه، ذوالفقاری و معرفت [۶] در سال (۲۰۱۰) یک مدل سه نقطه‌ای بر مبنای تفکیک احساس حرارتی بخشهای پوشیده و فاقد لباس ارائه نمودند. اما آنچه در مدل ایشان و نیز مدل‌های استاندارد آسایش حرارتی به آن توجه نشده است، مدلسازی لباس به صورت یک محیط متخلخل با قابلیت عبور هوا، رطوبت و بخار می‌باشد. بر این اساس، یکی از اهداف اصلی در تحقیق حاضر، مدلسازی انتقال حرارت و جرم در لباس به عنوان محیط متخلخل می‌باشد. باید توجه داشت که مدلسازی لباس به صورت محیط متخلخل پیشتر نیز توسط محققین بسیاری صورت گرفته است. ولی در مدلسازی‌های انجام گرفته، از سازوکارهای فیزیولوژیکی تنظیم دمای بدن و مدلسازی احساس حرارتی افراد صرفنظر شده است. به بیان دیگر، در تحقیقات انجام شده در مورد مدلسازی انتقال حرارت و جرم از لباس، بدن به صورت سطحی با دما و رطوبت ثابت مدل شده است. از جمله مهمترین تحقیقات صورت پذیرفته در این زمینه می‌توان به پژوهشهای فن<sup>۱</sup> و همکارانش [۷] اشاره نمود. ایشان در سال (۲۰۰۰)، مدلی را برای انتقال حرارت و رطوبت به‌مراه چگالش و جذب در لباس چند لایه بعنوان یک محیط متخلخل ارائه نمودند [۷]. مدل ایشان متشکل از دو معادله انرژی و معادله انتقال فاز گاز (رطوبت) می‌باشد. این مدل برای اولین بار اثر تجمع آب درون الیاف را بر روی ضریب هدایت بررسی نمود و همچنین انتقال حرارت تشعشی را بعلاوه بالا بودن اختلاف دمای دو مرز لباس وارد معادله انرژی کرد. همچنین فن در ادامه کارهای خود در سال (۲۰۰۳) با کمک همکارانش مدل کاملتری را برای انتقال حرارت و رطوبت بصورت کوپل شده به‌مراه تغییر فاز<sup>۲</sup> ارائه نمود [۸]. در این مدل معادله انتقال فاز مایع با سازوکارهای نفوذ و تغییر فاز به معادلات دیگر افزوده شد، در مدل جدید وی حالتی تحت عنوان حالت مافوق اشباع<sup>۳</sup> برای رطوبت نسبی معرفی گردید که آغاز چگالش منوط به رسیدن به آن حالت می‌باشد، نیز به کمک رابطه داری حرکت توده‌ای رطوبت درون لباس را توسط گرادیان فشار بدست آورد. فن مطالعات خود را در این زمینه گسترش داد و در سال (۲۰۰۷) روش حجم محدود را برای حل عددی مدل خود به کار برد و توانست تاثیر موقعیت مکانی و ابعاد لایه‌های مختلف را بر تجمع رطوبت و عملکرد عایق بودن لباس از نظر حرارتی در لباس‌های چند لایه بررسی نماید [۹]. در سال (۲۰۰۷)، هانگ<sup>۴</sup> و همکارانش ترم جابجایی فاز مایع را به معادله انتقال جرم مایع اضافه نمودند که در این ترم سرعت حجمی مایع توسط اثرات موئینگی محاسبه می‌گردد [۱۰].

همانطور که پیش تر گفته شد اکثر مدل‌های حرارتی بدن تاثیر لباس در نرخ تبخیر را در نظر نمی‌گیرند، درحقیقت با این فرض از تاثیرات جذب رطوبت و نفوذ تعرق درون لباس بر روی اتلافات حرارتی بدن صرفنظر می‌شود.

در این مقاله، مدلی کامل (شامل کلیه ترم‌های انتقال حرارت و جرم) جهت محاسبه اتلافات حرارتی لباس معرفی شده است تا بجای محاسبه انتقال حرارت بدن به محیط در مدل‌های حرارتی بدن استفاده شود. با

<sup>1</sup> J. Fan

<sup>2</sup> Phase Change

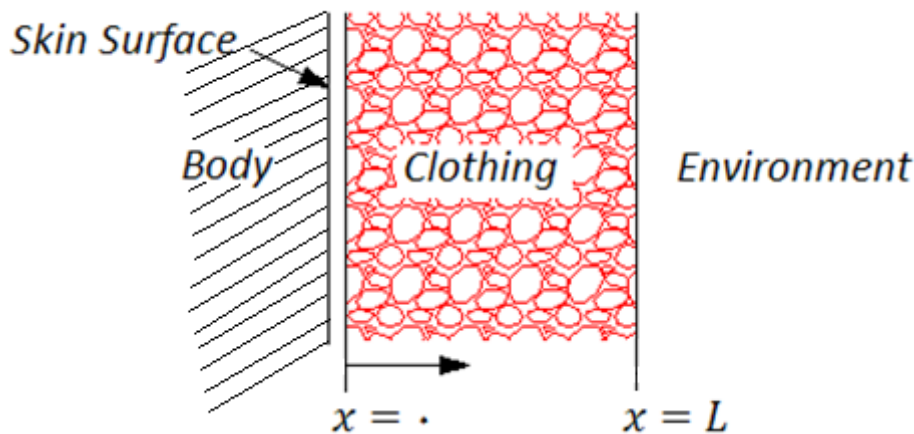
<sup>3</sup> Super Saturation

<sup>4</sup> H. Huang

توضیحات داده شده می‌توان جنبه نوآوری این تحقیق را به کاربرد مدل‌سازی نرخ تبخیر و انتقال جرم (رطوبت و تعرق) درون لباس، در مدل حرارتی بدن انسان نسبت داد.

## ۲- معادلات حاکم بر مدل‌سازی لباس

شکل (۱)، شماتیکی از لباس و مرزهای پیرامونی آن را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی فرضیات مهمی برای الیاف لباس و شرایط محیطی به شرح زیر استفاده شده است: ۱- الیاف دارای ساختاری ایزوتروپیک (همسانگرد) می‌باشد. ۲- ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی در الیاف در تمامی نقاط یکسان و ثابت می‌باشد. به عنوان مثال  $k_f$  در تمامی نقاط لباس ثابت و یکسان می‌باشد. ۳- در بین همه فازها تعادل حرارتی موضعی وجود دارد. ۴- از تغییرات حجم الیاف بعلت جذب رطوبت و آب صرف‌نظر شده است. ۵- از پراکندگی تشعشعی درون الیاف صرف‌نظر شده است. ۶- جابجایی اجباری مانند نفوذ جریان سریع باد در نظر گرفته نشده است [۸] و [۹]. معادلات حاکم بر مدل‌سازی لباس شامل سه معادله اصلی، یک معادله انرژی (معادله (۱)) و دو معادله انتقال جرم برای فاز گاز (معادله (۱۴)) و مایع (معادله (۱۵)) می‌باشد. این معادلات در ترم‌های تغییر فاز و جذب با یکدیگر کوپل می‌باشند [۱۱].



شکل ۱- شماتیکی از لباس و مرزهای پیرامونی آن

### ۲-۱- معادله انرژی

همانطور که در معادله (۱) دیده می‌شود، انتقال حرارت در لباس توسط مکانیزم‌های هدایت، جابجایی، تشعشع و تغییر فاز صورت می‌گیرد [۱۰].

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} + C_{vg} \varepsilon U \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial F_R}{\partial x} - \frac{\partial F_L}{\partial x} + \lambda \Gamma \quad (1)$$

در ترم گذرا،  $C_v(x, t)$  از رابطه (۲) قابل محاسبه خواهد بود [۱۰].

$$C_v(x, t) = \varepsilon(x, t) C_{vg} + (1 - \varepsilon(x, t)) \left( \frac{C_{vf} + \frac{\rho}{\rho_w} w(x, t) c_{vw}}{1 + \frac{\rho}{\rho_w} w(x, t)} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲) تخلخل لباس متغیر بوده و از رابطه (۳) بدست می آید.

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon' - \left(\frac{\rho}{\rho_w}\right) (1 - \varepsilon') \tilde{\omega}(x, t) \quad (۳)$$

حرکت توده‌ای رطوبت در لباس از قانون داریسی تبعیت می‌کند و از رابطه (۴) بدست می‌آید [۷].

$$U(x, t) = -\frac{k' \partial P_g(x, t)}{\mu_g \partial x} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) ضریب نفوذپذیری رطوبت در لباس می‌باشد که تابعی از جنس لباس بوده و نسبت به زمان ثابت باقی خواهد ماند. در رابطه داریسی ترم فشار بصورت مجموع فشار بخار  $P_v$  و فشار اتمسفر  $P_a$  قابل محاسبه خواهد بود  $(P_g = P_v + P_a)$ .

در این مدل فشار بخار از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.

$$P_v(x, t) = RH(x, t) P_{sat}(x, t) \quad (۵)$$

فشار بخار اشباع تنها تابعی از دما بوده که در این مدلسازی از رابطه (۶) جهت محاسبه آن استفاده می‌گردد.

(۶)

در رابطه (۵)،  $\Delta T = T(x, t) - 273$  می‌باشد. با فرض بخار بعنوان یک گاز کامل می‌توان از رابطه (۷) جهت تعیین فشار بخار استفاده نمود.

$$P_v(x, t) = \bar{R} C(x, t) T(x, t) \quad (۷)$$

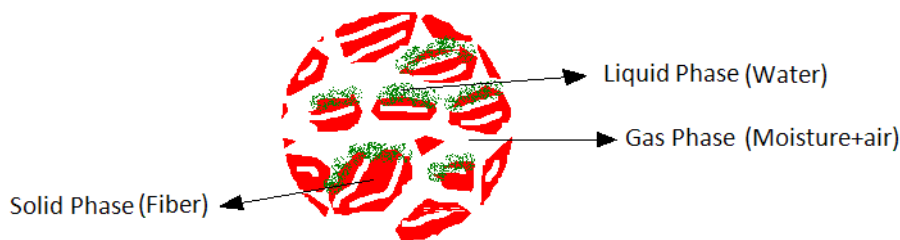
در ترم هدایت حرارت  $k_{eff}$  (ضریب انتقال حرارت هدایتی موثر) در هر لحظه تابعی از تخلخل  $\varepsilon(x, t)$  و درصد آب موجود در لباس  $w(x, t)$  بوده و از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد [۱۰].

$$k_{eff}(x, t) = \varepsilon(x, t) k_g + (1 - \varepsilon(x, t)) \left( \frac{k_f + \frac{\rho}{\rho_w} w(x, t) k_w}{1 + \frac{\rho}{\rho_w} w(x, t)} \right) \quad (۸)$$

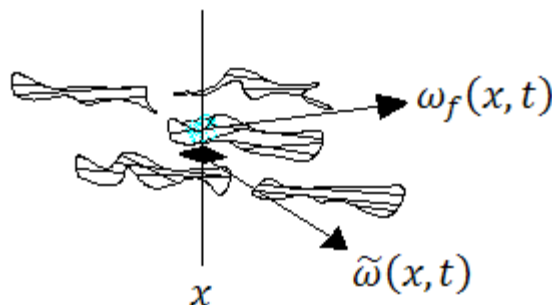
این مدلسازی در یک محیط متخلخل متشکل از سه فاز جامد (الیاف لباس)، مایع (آب) و گاز (بخار آب) انجام می‌پذیرد (شکل (۲)). در نتیجه پارامترهای موجود در هر معادله بر پارامترهای موثر معادلات دیگر تاثیر گذار خواهند بود. بطور مثال پارامتر  $w(x, t)$  از معادله (۱۵) بدست آمده و در این روابط (۲) و (۸) قرار می‌گیرد. در این مدلسازی با توجه به شکل (۳) آب موجود در لباس به دو بخش تقسیم می‌گردد، قسمتی از آن قابلیت جابجایی در فضاهای خالی لباس را دارد و از حل معادله (۱۵) بدست می‌آید و بخش دیگر، درون الیاف لباس بصورت جذب شده خواهد بود. در نتیجه میزان آب موجود در هر نقطه از لباس از رابطه (۹) بدست می‌آید [۷].

$$\omega(x, t) = \tilde{\omega}(x, t) + \omega_f(x, t) \quad (۹)$$

در این مقاله بدون ذکر جزئیات نحوه استخراج، دو معادله (۱۰-۱) و (۱۰-۲) جهت محاسبه انتقال حرارت تشعشعی درون لباس معرفی می‌شود [۷].



شکل ۲- فازهای موجود در محیط لباس



شکل ۳- شماتیکی از توزیع آب درون محیط لباس در نقطه x

$$\frac{\partial F_R}{\partial x} = -\beta F_R + \beta \sigma T^4 \tag{1-10}$$

$$\frac{\partial F_L}{\partial x} = \beta F_L - \beta \sigma T^4 \tag{2-10}$$

شرایط مرزی مورد نیاز جهت حل معادلات (۱-۱۰) و (۲-۱۰) به فرم روابط (۱۱) و (۱۲) بیان می‌گردد [۷].

$$F_L(L, t) = (1 - \xi_2)F_R(L, t) + \xi_2 \sigma T^4(L, t) \tag{11}$$

$$F_R(0, t) = (1 - \xi_1)F_L(0, t) + \xi_1 \sigma T^4(0, t) \tag{12}$$

در اثر تبادل شار حرارتی که بین بدن انسان و محیط بیرونی از طریق لباس صورت می‌گیرد ممکن است مقداری از این شار حرارتی توسط فاز مایع جذب شده و مقداری از مایع موجود در لباس تبخیر شود و یا بالعکس میزانی از انرژی حرارتی موجود در فاز بخار آزاد شده و چگالش صورت گیرد. در این مدلسازی جهت تعیین نرخ تبخیر و یا چگالش از رابطه هرتز- نادسن (رابطه (۱۵)) استفاده می‌گردد [۹].

$$\Gamma_{ce}(x, t) = -\frac{E}{R_f} \sqrt{\frac{(1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon')}{2\pi R}} \left( \frac{P_{sat}}{\sqrt{T_s}} - \frac{P_v}{\sqrt{T_v}} \right) \tag{13}$$

پدیده دیگری که بعنوان ترم تولید حرارت در معادله انرژی شناخته می‌شود، حرارت آزاد شده در اثر جذب رطوبت توسط الیاف لباس می‌باشد [۱۰]. نرخ کلی جذب و تغییر فاز  $(\Gamma(x, t) = \Gamma_s(x, t) + \Gamma_{ce}(x, t))$  بصورت ترم  $\lambda \Gamma(x, t)$  به معادله (۱) اضافه می‌گردد.

### ۲-۲- معادله انتقال جرم برای فاز بخار آب

معادله انتقال رطوبت بصورت معادله (۱۴) نوشته می‌شود، که در این معادله  $C(x, t)$  معرف غلظت بخار آب می‌باشد [۹].

$$\varepsilon(x, t) \frac{\partial C}{\partial t} + \varepsilon(x, t) U(x, t) \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{D_g}{\tau_c} \varepsilon(x, t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \Gamma(x, t) \quad (14)$$

### ۲-۳- معادله انتقال جرم برای فاز مایع

در این مدل‌سازی تنها قسمتی از آب موجود در فضای خالی لباس (شکل (۳)) قابلیت جابجایی و یا نفوذ را دارد. این پارامتر در هر نقطه حاصل تقسیم آب بر جرم کل الیاف بوده و از حل معادله (۱۵) بدست می‌آید [۱۰].

$$\rho(1 - \varepsilon) \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial U_w}{\partial x} = \rho(1 - \varepsilon) D_L \frac{\partial^2 \tilde{\omega}}{\partial x^2} + \Gamma_{ce}(x, t) \quad (15)$$

در ترم جابجایی، سرعت حرکت مایع از رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۱۰].

$$U_w(x, t) = - \frac{k'' k_{rw}}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \quad (16)$$

نفوذپذیری نسبی فاز مایع از روابط زیر محاسبه می‌گردد [۱۰].

$$s(x, t) = \frac{(1 - \varepsilon') \rho \tilde{\omega}(x, t)}{\varepsilon' \rho_w} \quad (17)$$

$$k_{rw} = s(x, t)^3 \quad (18)$$

فشار آب معادل فشار موئینگی بوجود آمده در بین الیاف لباس فرض می‌گردد. یعنی:  $P_w = -P_c$

$$j(x, t) = 1/417(1 - s) - 2/120(1 - s)^2 + 1/263(1 - s)^3 \quad (19)$$

$$P_c = \sigma' \sqrt{\frac{k''}{\varepsilon'}} j(x, t) \quad (20)$$

### ۳- شرایط مرزی

در این مدل‌سازی جهت حل سه معادله اصلی (معادلات (۱)، (۱۴) و (۱۵)) باید سه شرط مرزی مناسب تعیین گردد. برای معادله (۱) نرخ انتقال حرارت هدایتی درون لباس در مرزها با نرخ انتقال حرارت جابجایی به محیط برابر می‌باشد. تعریف ریاضی این شرط بصورت روابط (۲۱) و (۲۲) بیان می‌گردد [۸].  
در  $x = 0$

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{t,1} (T_{Body} - T(0, t)) \quad (21)$$

در  $x = L$ :

$$-k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{t,2} (T(L, t) - T_{ambient}) \quad (22)$$

برای معادله (۱۴) نیز نرخ نفوذ رطوبت درون لباس در مرزها با نرخ انتقال جرم رطوبت به محیط برابر بوده و به فرم روابط (۲۳) و (۲۴) تعریف می‌گردد [۸].

در  $x = 0$ :

$$-\frac{D_g}{\tau_c} \varepsilon(0, t) \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{c,1} (C_{Body} - C(0, t)) \quad (23)$$

در  $x = L$ :

$$-\frac{D_g}{\tau_c} \varepsilon(0, t) \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{c,2} (C(L, t) - C_{ambient}) \quad (24)$$

شرایط مرزی در  $x = 0$  برای معادله (۱۵) به دو صورت زیر قابل تعریف خواهد بود. در حالت تماس مستقیم با بدن، میزان جرم آب حاصل از تعرق بدن توسط رابطه (۲۵) به فرم درصد تجمع آب تبدیل می‌گردد.

$$\tilde{\omega}(0, t) = \frac{m(\cdot, t)_{Free\ water}}{M_{Fiber}} \quad (25)$$

و در حالت تماس غیر مستقیم با بدن چون فاز مایع قابلیت انتقال در هوا را ندارد، می‌توان شار انتقال فاز مایع را مساوی صفر قرار داد [۱۰].

$$q_w(0, t) = 0 \quad ==> \quad \frac{\partial \tilde{\omega}}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (26)$$

#### ۴- مدل حرارتی بدن و ارتباط آن با مدل لباس

در این تحقیق از مدل دولایه‌ای گایج جهت مدل‌سازی حرارتی بدن انسان استفاده شده است. در مدل دو لایه‌ای گایج، بدن به صورت دو استوانه هم مرکز مدل می‌شود که استوانه داخلی نماینده مرکز بدن بوده و استوانه خارجی نشانگر پوست می‌باشد. برای دو لایه مدل گایج (مرکز و پوست) معادله بالانس حرارت بدن بصورت مجزا بصورت معادلات (۲۷) و (۲۸) نوشته می‌شود [۱۵].

$$S_{cr} = M - W - (C_{res} + E_{res}) - Q_{cr.sk} \quad (27)$$

$$S_{sk} = Q_{cr.sk} - (C_{sk} + R_{sk} + E_{sk}) \quad (28)$$

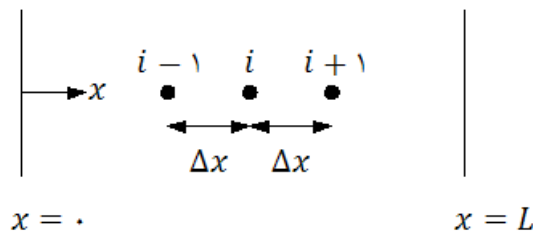
در این مدل برخی فرآیندهای کنترل و تنظیم کننده دمای بدن، از جمله تعرق تنظیمی، لرز و اتساع و انقباض رگها مدل‌سازی شده است. گایج برای پیش بینی شرایط آسایش حرارتی پارامتر احساس حرارتی TSENS را تعریف می‌کند. شاخص TSENS بیانگر احساس حرارتی افراد است و با عددی بین ۵- و ۵+ نشان داده می‌شود. بطوریکه هر عدد صحیح، معادل یک احساس حرارتی است: ۵+ گرمای غیر قابل تحمل، ۴+

خیلی داغ، ۳+ داغ، ۲+ گرم، ۱+ کمی گرم، ۰ خنثی، ۱- کمی خنک، ۲- خنک، ۳- سرد، ۴- خیلی سرد، ۵- سرمای غیر قابل تحمل [۱۵].

نحوه ارتباط این دو مدل بدین صورت است که در هر گام زمانی از مدل حرارتی بدن، دمای پوست و نرخ تعرق استخراج شده و بعنوان شرایط مرزی دو معادله (۱) و (۱۵) در مدل لباس استفاده می‌شود، پس از محاسبات مدل لباس نرخ انتقال حرارت لباس به محیط (مجموع نرخ تبادل حرارت از طریق تبخیر، جابجایی و تشعشع) بدست آورده شده و به عنوان ورودی در مدل بدن قرار می‌گیرد تا مجدداً "مدل بدن در گام زمانی بعدی دمای پوست و نرخ تعرق را محاسبه نماید.

### ۵- روش حل

در این مقاله از روش عددی اختلاف محدود جهت حل معادلات حاکم بر مدل‌سازی لباس استفاده شده است و با انتخاب روش کرنک-نیکلسون و بکارگیری فاکتور وزنی  $f$  معادلات اصلی گسسته سازی می‌شوند [۱۳]. محدوده تغییرات  $0 < f < 1$  می‌باشد، این بدان معنی است که اگر  $f = 0$  انتخاب شود معادلات به روش صریح گسسته‌سازی شده‌اند و اگر  $f = 1$  شود، روش کاملاً "ضمنی خواهد بود. در این تحقیق از فاکتور وزنی  $f = 0.5$  (کرنک-نیکلسون) استفاده شده است، جهت حل عددی نودهای محاسباتی مطابق شکل (۴) در نظر گرفته می‌شوند و در معادلات اصلی، مشتقات مکانی به طریق تفاضل مرکزی و مشتقات زمانی تفاضل رو به جلو از مرتبه اول گسسته سازی می‌شوند. رابطه (۲۹) فرم گسسته سازی شده معادله (۱) را به همراه ضرایب آن نشان می‌دهد.



شکل ۴- نودهای محاسباتی

$$A_i^{n+1} T_{i-1}^{n+1} + B_i^{n+1} T_i^{n+1} + C_i^{n+1} T_{i+1}^{n+1} = D_i^n \quad (29)$$

$$A_i^{n+1} = -f C_{vg} \frac{\varepsilon_i^{n+1} U_i^{n+1}}{2\Delta x} - f \frac{K_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

$$B_i^{n+1} = \frac{C_{vi}^{n+1}}{\Delta t} + f \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} + K_{i-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

$$C_i^{n+1} = f C_{vg} \frac{\varepsilon_i^{n+1} U_i^{n+1}}{2\Delta x} - f \frac{K_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta x^2}$$



$$D_i^n = \frac{C_{vg}^n}{\Delta t} T_i^n - (1-f) \left[ C_{vg} \varepsilon_i^n U_i^n \left( \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) \right] + (1-f) \left[ K_{i+\frac{1}{2}}^n \left( \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} \right) \right] - (1-f) \left[ K_{i-\frac{1}{2}}^n \left( \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) \right] + \theta_i^n$$

معادله (۱۴) نیز به شکل رابطه (۳۰) گسسته سازی می‌شود.

$$A_i^{n+1} C_{i-1}^{n+1} + B_i^{n+1} C_i^{n+1} + C_i^{n+1} C_{i+1}^{n+1} = D_i^{n+1} \quad (30)$$

$$A_i^{n+1} = -f \frac{\varepsilon_i^{n+1} U_i^{n+1}}{2\Delta x} - f \frac{D_g \varepsilon_i^{n+1}}{\tau_c \Delta x^2}$$

$$B_i^{n+1} = \frac{\varepsilon_i^{n+1}}{\Delta t} + 2f \frac{D_g \varepsilon_i^{n+1}}{\tau_c \Delta x^2}$$

$$C_i^{n+1} = f \frac{\varepsilon_i^{n+1} U_i^{n+1}}{2\Delta x} - f \frac{D_g \varepsilon_i^{n+1}}{\tau_c \Delta x^2}$$

$$D_i^{n+1} = \frac{\varepsilon_i^n}{\Delta t} C_i^n - (1-f) \varepsilon_i^n U_i^n \left( \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2\Delta x} \right) + (1-f) \frac{D_g}{\tau_c} \varepsilon_i^n \left( \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) - \Gamma_i^n$$

و معادله (۱۵) به فرم رابطه (۳۱) بدست می‌آید.

$$\bar{A}_i^{n+1} \bar{\omega}_{i-1}^{n+1} + \bar{B}_i^{n+1} \bar{\omega}_i^{n+1} + \bar{C}_i^{n+1} \bar{\omega}_{i+1}^{n+1} = \bar{D}_i^n \quad (31)$$

$$\bar{A}_i^{n+1} = -f \frac{D_L}{\Delta x^2}$$

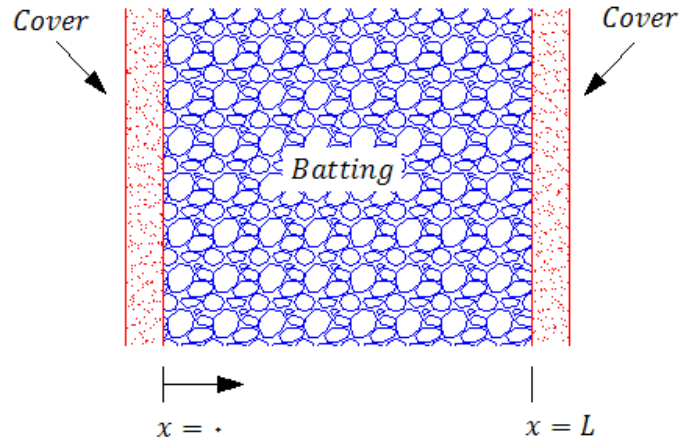
$$\bar{B}_i^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} + 2f \frac{D_L}{\Delta x^2}$$

$$\bar{C}_i^{n+1} = -f \frac{D_L}{\Delta x^2}$$

$$\bar{D}_i^n = \frac{\bar{\omega}_i^n}{\Delta t} + (1-f) D_L \left( \frac{\bar{\omega}_{i+1}^n - 2\bar{\omega}_i^n + \bar{\omega}_{i-1}^n}{\Delta x^2} \right) + \frac{\Gamma_{ce_i}^n}{\rho (1 - \varepsilon_i^n)}$$

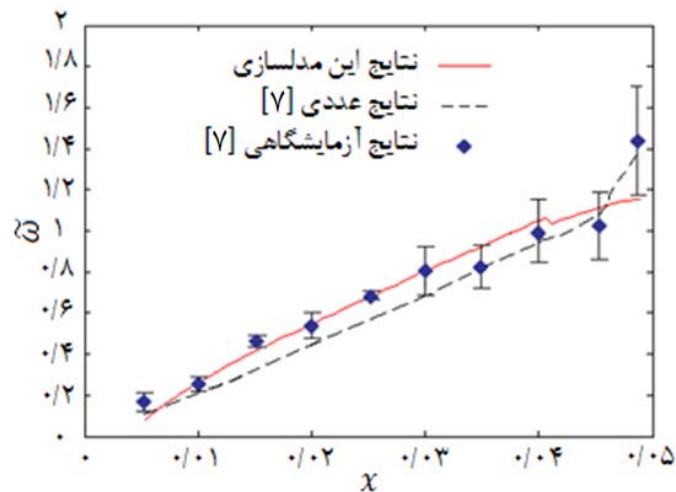
## ۶- اعتبارسنجی

در این تحقیق جهت سنجش اعتبار کد عددی و نتایج ارائه شده در بخش نتیجه‌گیری، در دو مرحله (مدل لباس به تنهایی و مدل لباس + بدن) اعتبارسنجی صورت گرفته است. شکل (۵) لباسی متشکل از الیاف پلی استر به همراه دو لایه کاور از جنس نایلون را نشان می‌دهد [۷]. در مرحله اول اعتبارسنجی کلیه خواص فیزیکی، ابعادی و شرایط مرزی [۷] انتخاب می‌شود و نتایج برای درصد تجمع آب در لباس بعد از گذشت زمان ۸ ساعت و ۲۴ ساعت مطابق با نمودارهای شکل (۶) و (۷) ترسیم می‌گردد. نتایج حاصله را می‌توان با نتایج عددی و آزمایشگاهی مرجع [۷] مقایسه نمود. این مقایسه نشان دهنده صحت کارکرد الگوریتم و کد محاسباتی در حل معادلات حاکم خواهد بود. در مرحله دوم اعتبارسنجی، لباسی از جنس کتان در نظر گرفته شده است که در تماس مسقیم با بدن می‌باشد [۷]. نتایج مربوط به تغییرات دمای پوست بدن انسان در دو حالت متفاوت لباس با نتایج [۱۴] مقایسه شده است.

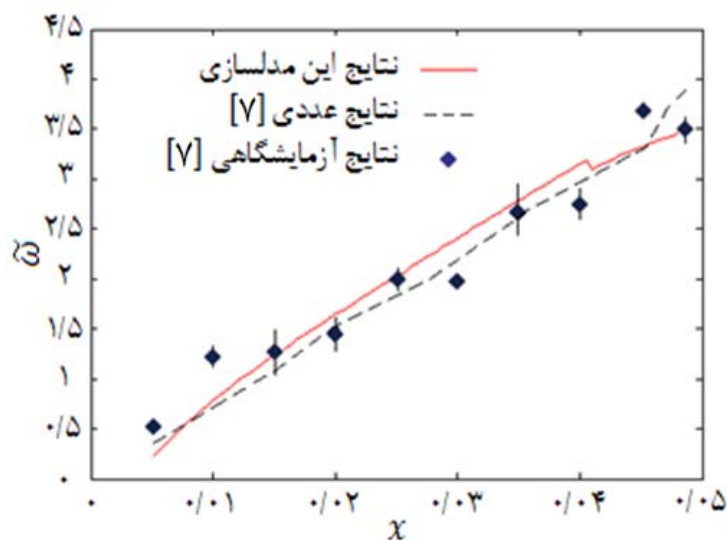


شکل ۵- شماتیک لباس چند لایه

در حالت اول، برای  $I_{cl} = 0.35 C_{lo}$  لباس کتانی منظور می‌گردد و فرد در ابتدا درون محیطی با دمای ۲۸ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ به مدت ۳۰ دقیقه قرار می‌گیرد سپس وارد محیط دیگری با دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۵۰٪ شده و ۶۰ دقیقه نیز در آن محیط خواهد بود. نتایج مربوط به حالت اول در شکل (۸) ارائه شده است. در حالت دوم، فرد لباسی از جنس کتان با  $I_{cl} = 0.1 C_{lo}$  را پوشیده و درون محیطی با دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۴۰٪ به مدت ۳۰ دقیقه قرار می‌گیرد، سپس وارد محیط دیگری با دمای ۴۸ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۳۰٪ شده و ۱۲۰ دقیقه در آن محیط خواهد بود و دوباره به محیط اولیه خود باز خواهد گشت. شکل (۹) تغییرات دمای پوست را نسبت به زمان برای لباس مذکور نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بعد از گذشت زمان ۸ ساعت

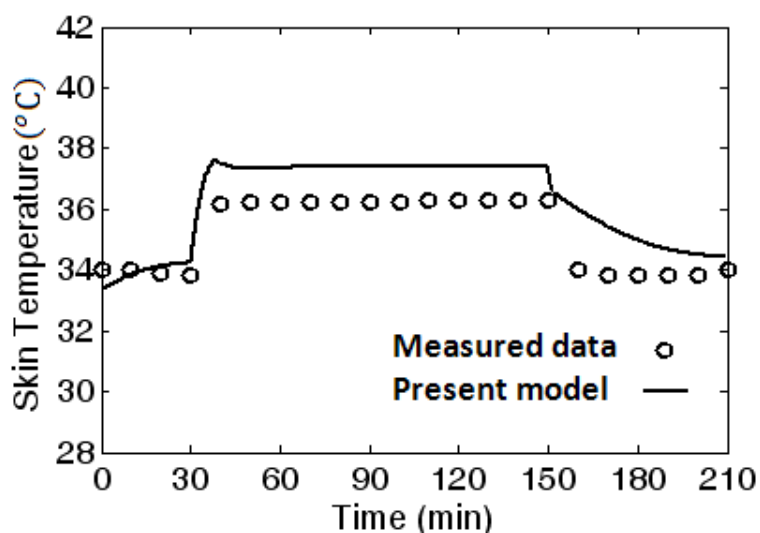


شکل ۷- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بعد از گذشت زمان ۲۴ ساعت

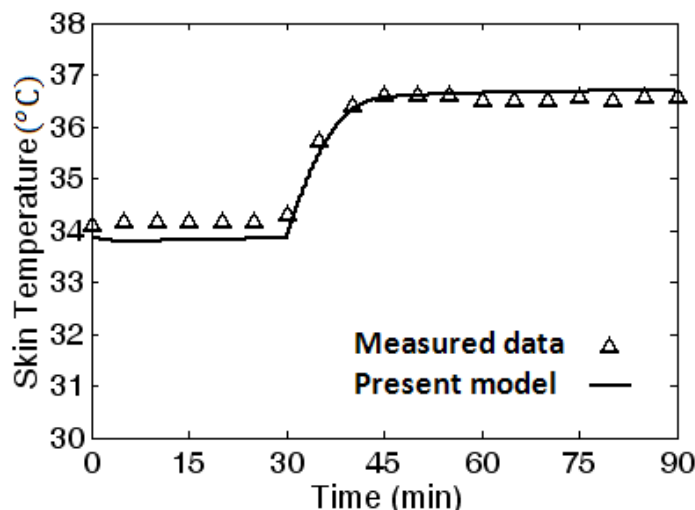
## ۷- نتایج و بحث

### ۷-۱- تحلیل پارامترهای ساختاری و فیزیکی مهم

در این مقاله لباسی به ضخامت معین از جنس کتان با خواص مشخص مدل شده است [۱۲] و اثرات پارامترهای اصلی لباس از جمله ضریب تخلخل، ضریب نفوذپذیری و ضریب هدایت حرارتی بر اتلاف حرارت تبخیری و میزان تری لباس مورد نظر بررسی شده است.



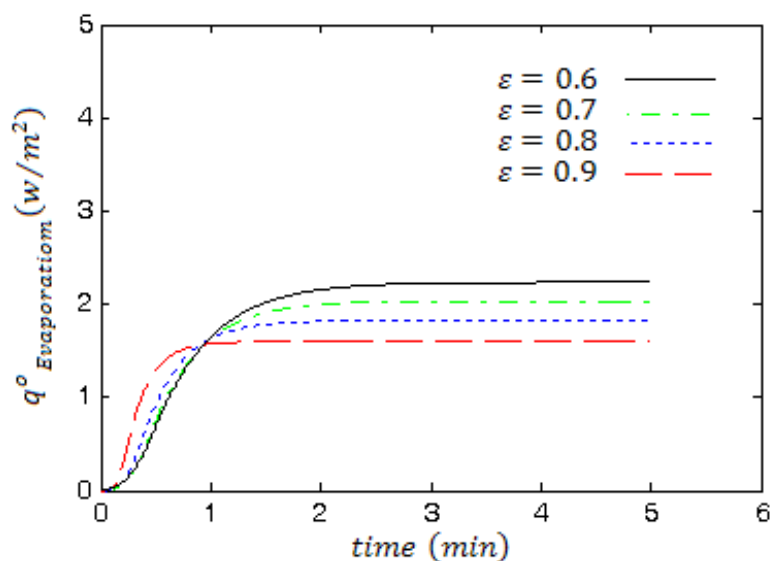
شکل ۸- تغییرات دمای پوست نسبت به زمان برای  $I_{cl} = 0.35 Clo$



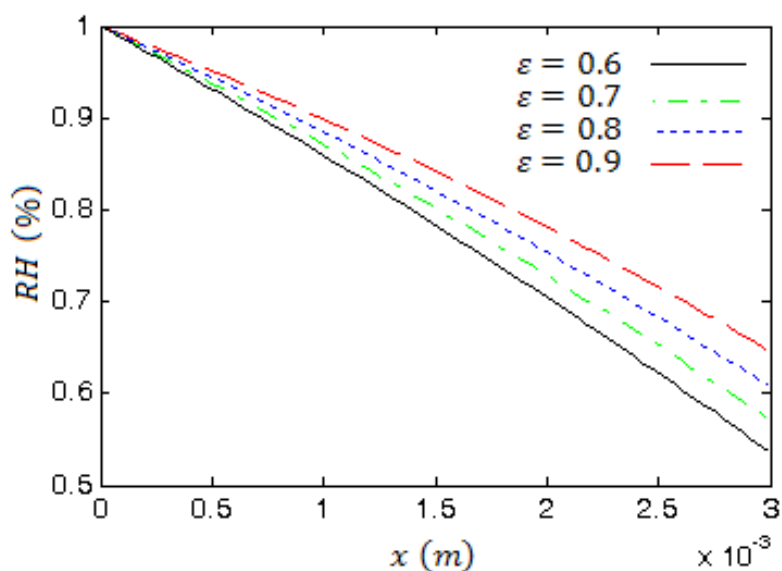
شکل ۹- تغییرات دمای پوست نسبت به زمان برای  $I_{cl} = 0.1 Clo$

#### ۷-۱-۱- ضریب تخلخل

ضریب تخلخل بعنوان یک پارامتر ساختاری لباس مطرح می‌گردد که بیانگر نوع بافت، ریز بافت (تخلخل پایین) یا درشت بافت (تخلخل بالا) بودن لباس خواهد بود. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد در ابتدا به علت خشک بودن لباس تبخیر وجود ندارد ولی بلافاصله بعد از نفوذ فاز مایع ناشی از تعرق بدن به درون لباس، تبخیر شروع شده و با افزایش تجمع آب درون لباس، تبخیر افزایش می‌یابد و با گذشت زمان مقداری ثابت خواهد شد. نکته قابل توجه در این شکل آن است که با کاهش ضریب تخلخل اتلافات تبخیری درون لباس افزایش می‌یابد. این نکته را این گونه می‌توان استدلال نمود که با کاهش تخلخل لباس، رطوبت نسبی هوای موجود در لابلای منافذ لباس کاهش یافته (شکل (۱۱)) و از غلظت بخار هوای در تماس با فاز مایع درون لباس کاسته می‌شود و در نهایت این امر سبب می‌گردد تبخیر بهتر و با نرخ بیشتری صورت پذیرد. همانطور که دیده شد کاهش تخلخل، نرخ تبخیر را افزایش می‌دهد پس در نگاه اول شاید به نظر برسد افزایش تبخیر درصد تجمع آب درون لباس را کاهش دهد ولی آنچه در نمودارهای شکل (۱۲) دیده می‌شود عکس این مطلب می‌باشد، یعنی کاهش تخلخل موجب افزایش درصد تجمع آب درون لباس شده است. علت آن است که کاهش تخلخل سبب شده ترم نفوذ فاز مایع افزایش یافته و بر ترم تبخیر غالب گردد و در پی آن درصد تجمع آب بواسطه نفوذ بیشتر، افزایش یابد. نکته مهم قابل درک از شکل (۱۲) آنست که تغییر تخلخل هیچگونه تاثیری بر دبی گرمی ورودی بر روی سطح خارجی لباس نخواهد داشت، به عبارت بهتر تغییر تخلخل تاثیری بر نرخ تبخیر بر روی سطح لباس بوجود نخواهد آورد.



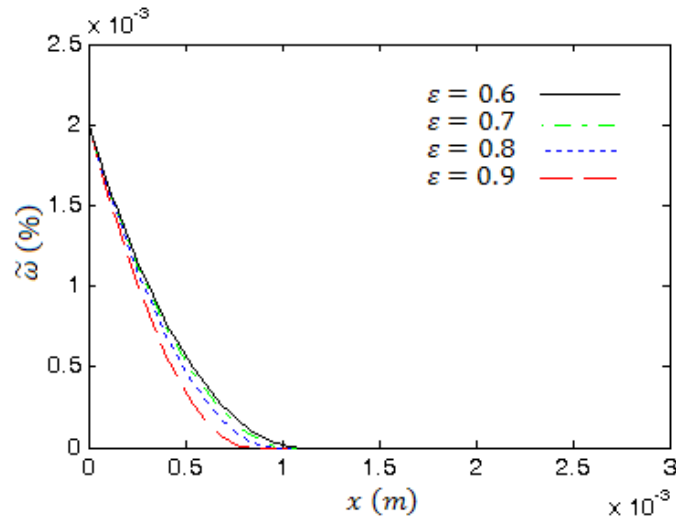
شکل ۱۰- تغییرات شار حرارتی تبخیر درون لباس نسبت به زمان با تغییرات ضریب تخلخل از ۰/۶ تا ۰/۹.



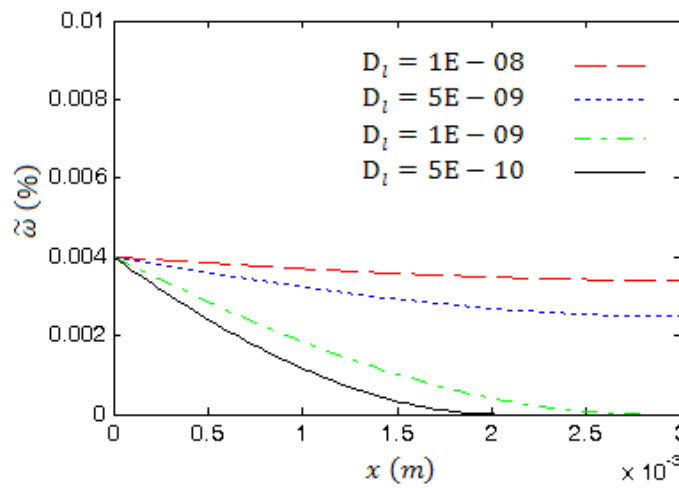
شکل ۱۱- تغییرات رطوبت نسبی درون لباس نسبت به مکان با تغییرات ضریب تخلخل از ۰/۶ تا ۰/۹.

### ۷-۱-۲- ضریب نفوذپذیری

شکل (۱۳) توزیع مایع درون لباس نسبت به مکان بعد از گذشت ۲ ساعت را نشان می‌دهد، همانگونه که پیداست با افزایش ضریب نفوذپذیری تجمع آب درون لباس و به دنبال آن تجمع مایع بر روی سطح لباس افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش نفوذپذیری، جرم مایع ناشی از تعرق زودتر به سطح خارجی لباس خواهد رسید (شکل (۱۴)) و تبخیر سطحی لباس افزایش خواهد یافت.

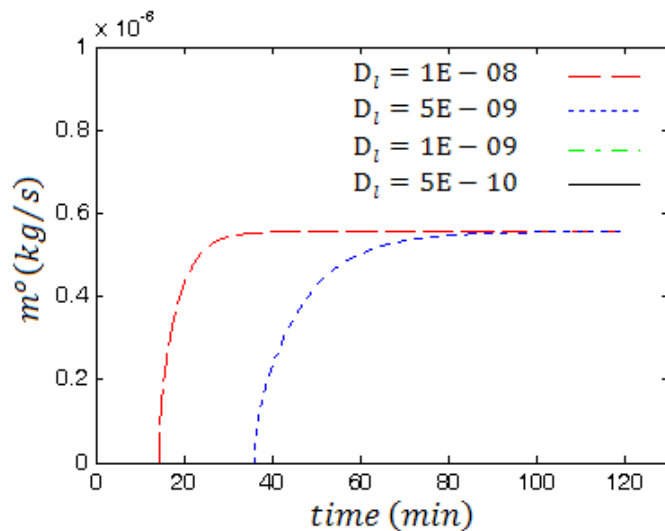


شکل ۱۲- تغییرات تجمع آب درون لباس نسبت به مکان با تغییرات ضریب تخلخل ۰/۶ تا ۰/۹.



شکل ۱۳- تغییرات تجمع آب درون لباس نسبت به مکان با تغییرات ضریب نفوذپذیری

مایع از  $۵ \times 10^{-10}$  تا  $۱ \times 10^{-8}$

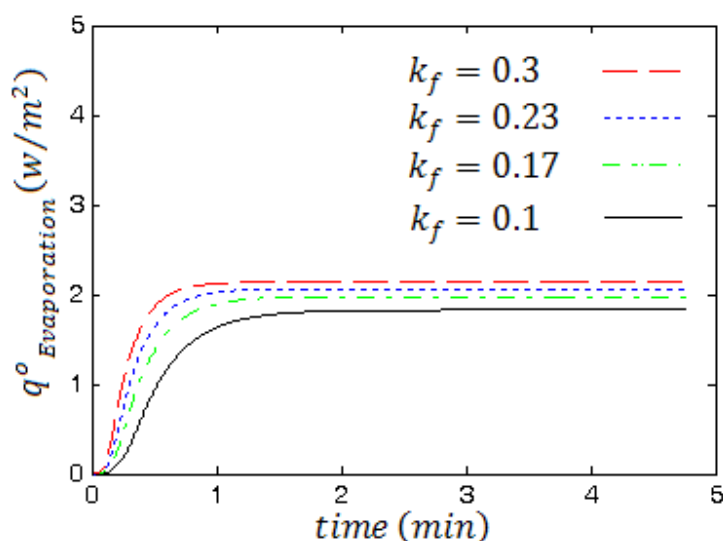


شکل ۱۴- تغییرات دبی مایع روی سطح خارجی لباس نسبت به زمان با تغییرات ضریب نفوذپذیری

مایع درون لباس از  $۵ \times 10^{-10}$  تا  $۱ \times 10^{-8}$

### ۷-۱-۳- ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی هیچگونه تاثیری بر تجمع آب در لباس نداشته و در پی آن تبخیر سطحی لباس را دستخوش تغییر نمی‌کند ولی از سوی دیگر تاثیر بسزایی در اتلافات تبخیری درون لباس خواهد داشت، با دقت به نمودارهای شکل (۱۵) مشاهده می‌شود با افزایش هدایت حرارتی الیاف، اتلافات تبخیری لباس افزایش می‌یابد. می‌توان تاثیر ضریب هدایت حرارتی الیاف را اینگونه استدلال نمود که با افزایش این ضریب، شار حرارتی ورودی به لباس بیشتر شده و بدنال افزایش مقادیر توزیع دما، فشار اشباع افزایش خواهد یافت و از آنجایی که تاثیر افزایش فشار اشباع نسبت به افزایش دما بیشتر است موجب می‌گردد رطوبت نسبی لباس کاهش یافته و به دنبال آن اتلافات تبخیری افزایش یابد.



شکل ۱۵- تغییرات اتلافات تبخیری درون لباس نسبت به زمان با تغییرات ضریب هدایت حرارتی از ۰/۱ تا ۰/۳.

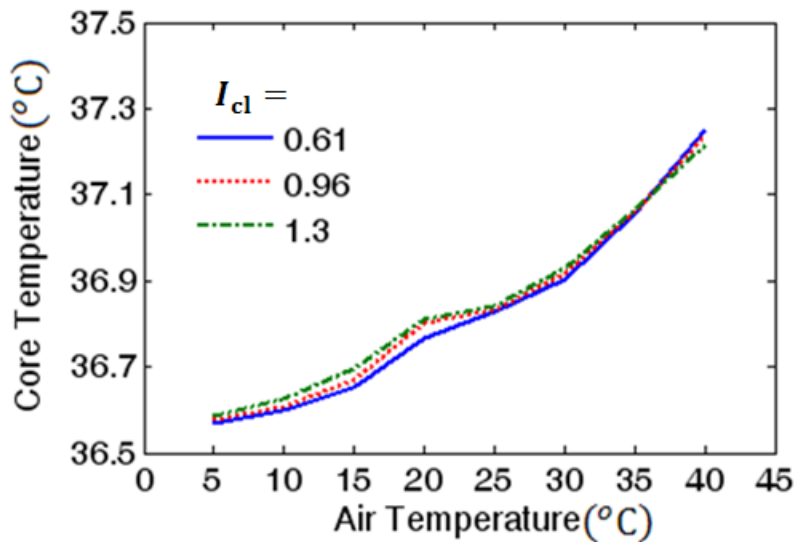
### ۷-۲- تحلیل کمیت های موثر بر آسایش حرارتی

در این بخش تاثیر شرایط محیطی و نوع لباس مصرفی (جدول (۱)) بر کمیت های موثر بر آسایش حرارتی انسان از قبیل دمای پوست و مرکز بدن، نرخ تعرق، نرخ انتقال حرارت از لباس به محیط و احساس حرارتی در حالت پایا مورد بررسی قرار گرفته است. با دقت در شکل (۱۶) دیده می‌شود با افزایش دمای محیط، دمای مرکز بدن در حالت پایا افزایش خواهد یافت بطوریکه دمای مرکز بدن با افزایش دمای محیط از ۵ به ۴۰ درجه سانتیگراد به میزان ۰/۷ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد.

جدول ۱- تعریف سه نوع لباس با کاربری متفاوت [۱۵]

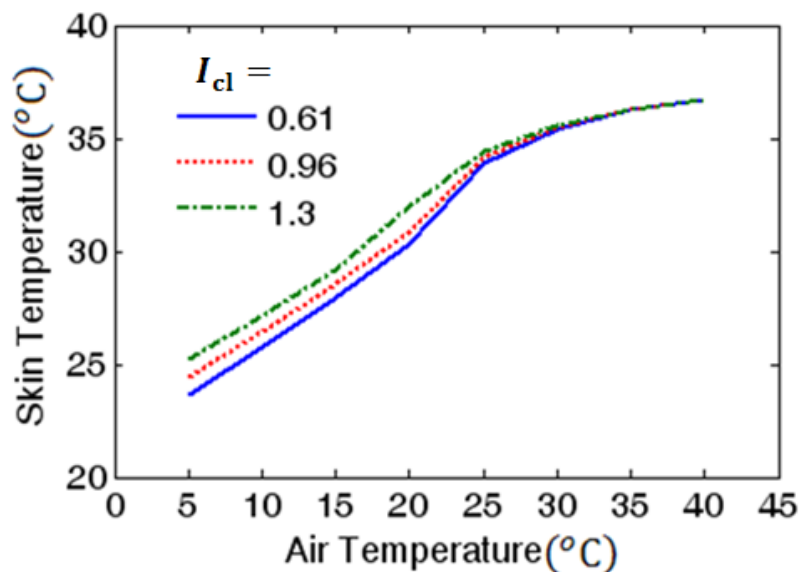
اجزای لباس	$I_t$	نوع کاربری
شلوار+پیراهن آستین بلند	۰/۶	لباس اداری تابستانه
شلوار+پیراهن آستین بلند+جلیقه	۰/۹۶	لباس اداری زمستانه
کت و شلوار+پیراهن آستین بلند+جلیقه	۱/۳	لباس اداری ضخیم زمستانه

در شکل (۱۶) ذکر دو نکته حائز اهمیت می‌باشد اول آنکه در دماهای محیطی یکسان با افزایش پارامتر  $I_{cl}$  لباس، دمای مرکز بدن نیز افزایش خواهد یافت. مثلاً در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد اختلاف دمای مرکز بدن برای دولباس اداری ضخیم زمستانه و اداری تابستانه حدوداً ۰/۱ درجه سانتیگراد خواهد بود و دوم آنکه بعد از دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بعلت شروع نرخ تعرق بدن و در پی آن تبخیر، نرخ افزایش دمای مرکز بدن کاهش می‌یابد.



شکل ۱۶- تغییرات دمای مرکز بدن در حالت پایا پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت برای سه لباس

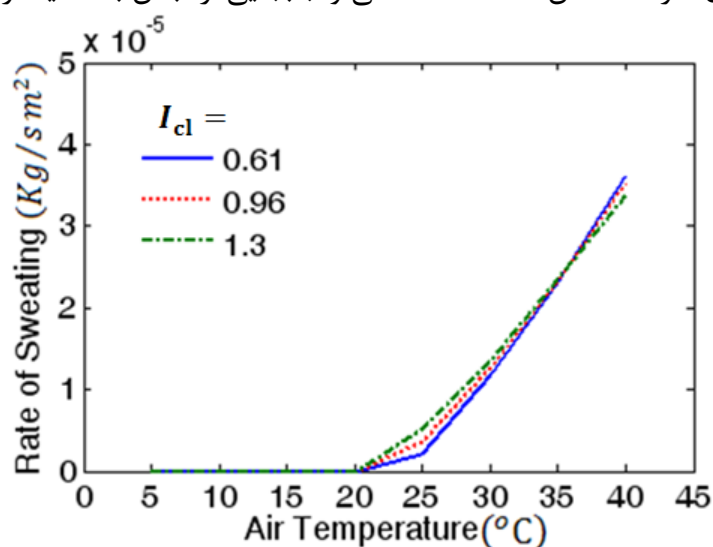
یکی از مهمترین پارامترها در تعیین آسایش حرارتی انسان دمای پوست می‌باشد، شکل (۱۷) تغییرات آن را نشان می‌دهد. نکته مهم آن است که این کمیت در دمای محیط یکسان برای لباس ضخیم اداری زمستانه نسبت به لباس اداری تابستانه حدوداً ۲ درجه بیشتر خواهد بود که البته این اختلاف از دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به بعد کاهش یافته (بعلت شروع تبخیر) و نهایتاً از بین می‌رود.



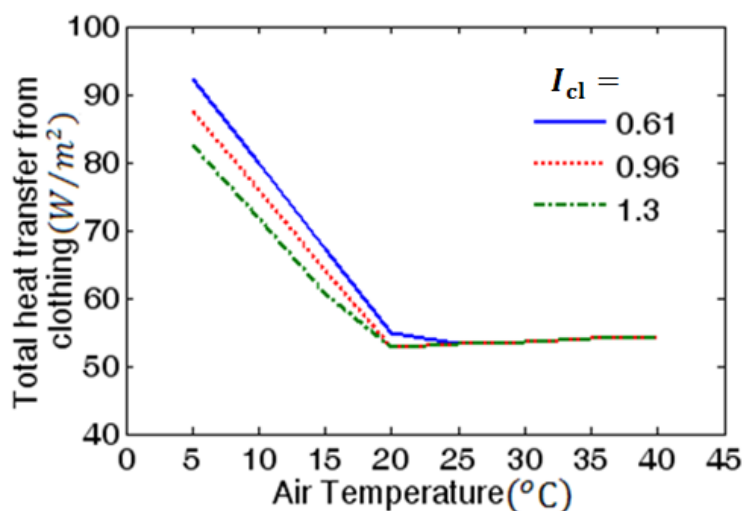
شکل ۱۷- تغییرات دمای پوست در حالت پایا پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت برای سه لباس



همانگونه که مشخص است شروع تعرق به دمای محیط و نوع لباس وابسته می باشد. با توجه به شکل (۱۸) دیده می شود برای هر سه نوع لباس تا دمای قبل از ۲۰ درجه سانتیگراد هیچگونه تعرقی بر روی سطح بدن بوجود نمی آید و آغاز این پدیده در محدوده دمایی ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتیگراد خواهد بود. زمانی که فرد لباس ضخیم اداری زمستانه می پوشد، تعرق زودتر و با نرخ بیشتری نسبت به دو نوع لباس دیگر رخ می دهد. علت آنست که با پوشیدن این لباس نرخ انتقال حرارت از بدن به محیط کاهش یافته، در نتیجه بدن باید با افزایش تعرق و در پی آن افزایش اتلافات تبخیری در پی جبران این کاهش برآید. در شکل (۱۹) نیز این مطلب به روشنی دیده می شود که با افزایش دمای محیط نرخ انتقال حرارت بدن به محیط کاهش یافته بطوریکه لباس اداری زمستانه نسبت به لباس اداری تابستانه اتلافات حرارتی کمتری خواهد داشت. با دقت در این شکل مشاهده می گردد که چگونه بدن سعی می نماید از دمای حدوداً " ۲۰ درجه سانتیگراد به بعد با افزایش اتلافات تبخیری، اثرات کاهش اتلافات تشعشی و جابجایی از لباس به محیط را جبران نماید.

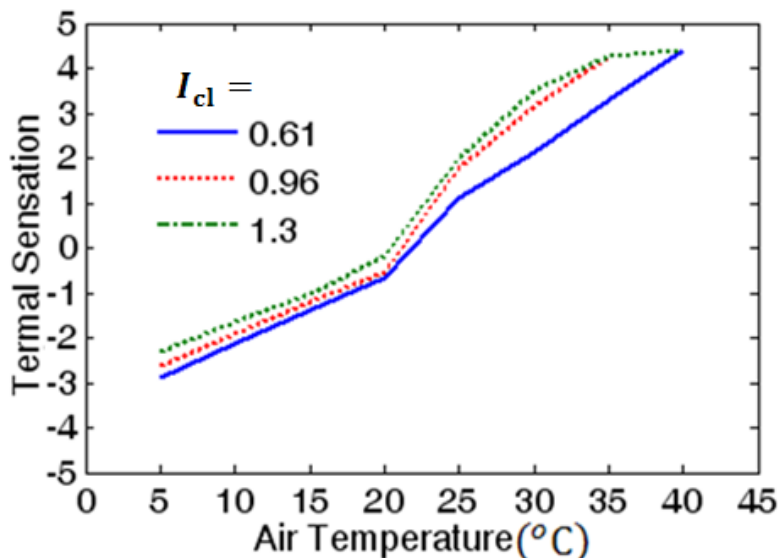


شکل ۱۸- تغییرات نرخ تعرق در حالت پایا پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت برای سه لباس



شکل ۱۹- تغییرات نرخ انتقال حرارت از لباس به محیط در حالت پایا پس از قرار گرفتن فرد در محیط با دماهای متفاوت برای سه لباس

در شکل (۲۰) احساس حرارتی انسان برای سه نوع لباس در شرایط محیطی متفاوت در حالت پایا ترسیم شده است، این نمودار بسیار مفید می‌باشند بعنوان مثال زمانی که فرد لباس اداری ضخیم می‌پوشد در محدوده دمایی ۱۷ تا ۲۳ درجه سانتیگراد احساس حرارتی خنثی دارد در حالیکه این احساس برای لباس اداری تابستانه بین دماهای ۲۱ تا ۲۵ درجه خواهد بود.



شکل ۲۰- تغییرات احساس حرارتی فرد در حالت پایا پس از قرار گرفتن در محیط با دماهای متفاوت برای سه لباس

## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش تحلیل پارامتریک، دیده می‌شود پارامترهای مذکور نقش مهمی بر اتلافات تبخیری و تری لباس خواهند داشت بطوریکه:

- (۱) ضریب تخلخل لباس تاثیر بسزایی در اتلاف حرارت تبخیری و میزان تری لباس خواهد داشت بطوریکه با کاهش ضریب تخلخل از ۰/۹ به ۰/۶، سهم اتلافات حرارت تبخیری حدود ۴۰٪ افزایش یافته و کاهش تخلخل موجب افزایش درصد تجمع آب درون لباس خواهد شد این در حالی است که تخلخل تاثیری بر نرخ تبخیر بر روی سطح لباس بوجود نخواهد آورد.
- (۲) ضریب نفوذپذیری فاز مایع بعنوان یک خاصیت فیزیکی الیاف لباس مطرح شده است. این ضریب هیچگونه تاثیری بر نرخ تبخیر درون لباس نداشته اما با افزایش این ضریب تجمع آب درون لباس افزایش می‌یابد. این درحالی است که با افزایش نفوذپذیری، دبی جرمی در مدت زمان کمتری به سطح خارجی رسیده و سبب می‌گردد اتلافات تبخیر سطحی لباس افزایش یابد.
- (۳) ضریب هدایت حرارتی هیچگونه تاثیری بر تجمع آب در لباس نداشته و در پی آن تبخیر سطحی لباس را دستخوش تغییر نمی‌کند ولی با افزایش هدایت حرارتی الیاف از ۰/۱ تا ۰/۳، سهم اتلافات حرارت تبخیری لباس حدود ۱۷٪ افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج ارائه شده نوع لباس و شرایط محیطی تاثیر بسزایی بر کمیت های موثر بر آسایش حرارتی خواهند داشت بطوریکه:

(۱) با افزایش دمای محیط از ۵ به ۴۰ درجه سانتیگراد دمای مرکز بدن در حالت پایا به میزان ۰/۷ درجه سانتیگراد افزایش می یابد، و نیز در دماهای محیطی یکسان مثلاً در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد با افزایش پارامتر  $I_{cl}$  لباس از ۰/۶ تا ۱/۳، دمای مرکز بدن حدوداً ۰/۱ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت.

(۲) دمای پوست بدن در دمای محیط یکسان برای لباس ضخیم اداری زمستانه نسبت به لباس اداری تابستانه حدوداً ۲ درجه بیشتر خواهد بود که البته این اختلاف از دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به بعد کاهش یافته (بعلت شروع تبخیر) و نهایتاً از بین می رود.

(۳) برای هر سه نوع لباس تا دمای قبل از ۲۰ درجه سانتیگراد هیچگونه تعرقی بر روی سطح بدن بوجود نمی آید و آغاز این پدیده در محدوده دمایی ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتیگراد خواهد بود.

(۴) هر لباس در یک محدوده دمای معین برای فرد احساس حرارتی خنثی ایجاد می نماید، مثلاً زمانی که فرد لباس اداری ضخیم می پوشد در محدوده دمایی ۱۷ تا ۲۳ درجه سانتیگراد احساس حرارتی خنثی دارد در حالیکه این احساس برای لباس اداری تابستانه بین دماهای ۲۱ تا ۲۵ درجه خواهد بود.

(۵) میزان نرخ تعرق در هر زمان برای لباس ضخیم اداری زمستانی نسبت به لباس اداری تابستانه بیشتر خواهد بود مثلاً پس از گذشت ۹۰ دقیقه نرخ تعرق در لباس ضخیم اداری ۳۰٪ بیشتر خواهد بود.

## مراجع

- [1] Jones, B.W., "Capabilities and Limitations of Thermal Models for use in Thermal Comfort Standards", *Energy and Buildings*, Vol. 34, pp. 653-659, (2002).
- [2] Fanger, P. O., "*Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering*", McGraw-Hill, New York, (1970).
- [3] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., and Nishi, Y., "An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response", *ASHRAE Transactions*, Vol. 77, pp. 247-262, (1971).
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 55, "*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*", Atlanta, ASHRAE Inc. (2004).
- [5] ISO7730. "*Moderate Thermal Environments-determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*", International Standards Organization, (1994).

- [6] Zolfaghari, A., and Maerefat, M., "A New Simplified Model for Evaluating Non-uniform Thermal Sensation Caused by Wearing Clothing", *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 776-783, (2010).
- [7] Fan, J., Luo, Z., and Li, Y., "Heat and Moisture Transfer with Sorption and Condensation in Porous Clothing Assemblies and Numerical Simulation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2989-3000, (2000).
- [8] Fan, J., Cheng, X., Wen, X., and Sun, W., "An Improved Model of Heat and Moisture Transfer with Phase Change and Mobile Condensates in Fibrous and Comparison with Experimental Result", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2343-2353, (2004).
- [9] Wu, H., and Fan, J., "Study of Heat and Moisture Transfer with in Multi-layer Clothing Assemblies Consisting of Different Types of Battings", *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 47, pp. 641-647, (2008).
- [10] Huang, H., Ye, C., and Sun, W., "Moisture Transport in Fibrous Clothing Assemblies", *J. Eng Math*, Vol. 61, pp. 35-54, (2007).
- [11] Fu, G., "A Transient, 3-D Mathematical Thermal Model for the Clothing Human", Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, Kansas State University, (1995).
- [12] Wang, Z., "Heat and Moisture Transfer and Clothing Thermal Comfort", Ph.D Thesis, Department of Mechanical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, (2002).
- [13] Patankar, S.V., "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", Vol. 5, Taylor & Francis. pp-197-197, (1980).
- [14] Zolfaghari, A., and Maerefat, M., "A New Simplified Thermoregulatory Bioheat Model for Evaluating Thermal Response of the Human Body to Transient Environments", *Building and Environment*, Vol. 45, pp. 2068-2076, (2010).
- [15] ASHRAE Standard, Chapter 8, "*Thermal Comfort -ASHRAE Fundamentals*", SI Version, (2001).

### فهرست نمادهای انگلیسی

- $C$  : غلظت بخار آب در لابلای منافذ لباس
- $C_v$  : ظرفیت حرارتی حجمی موثر الیاف
- $C_{vf}$  : ظرفیت حرارتی الیاف
- $C_{vg}$  : ظرفیت حرارتی فاز بخار
- $C_{vw}$  : ظرفیت حرارتی فاز مایع
- $C_{res}$  : نرخ انتقال حرارت از بدن به محیط از طریق جابجایی در تنفس
- $C_{sk}$  : نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق جابجایی
- $D_g$  : ضریب نفوذ بخار در لابلای منافذ لباس

- $D_L$ : ضریب نفوذ آب در الیاف
- $E$ : ضریب چگالش یا تبخیر الیاف
- $E_{res}$ : نرخ انتقال حرارت از بدن به محیط از طریق تبخیر در تنفس
- $E_{sk}$ : نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق تبخیر سطح پوست
- $F_R$ : نرخ تشعشعی صدوری به سمت راست
- $F_L$ : نرخ تشعشعی صدوری به سمت چپ
- $h_t$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی
- $h_c$ : ضریب انتقال غلظت جابجایی
- $k_{eff}$ : ضریب هدایت حرارتی موثر الیاف
- $k_f$ : ضریب هدایت حرارتی الیاف
- $k_g$ : ضریب هدایت حرارتی فاز گاز
- $k_{rw}$ : نفوذپذیری نسبی محیط متخلخل
- $k_w$ : ضریب هدایت حرارتی فاز مایع
- $k'$ : نفوذپذیری محیط متخلخل
- $M$ : نرخ متابولیک
- $P_a$ : فشار هوا
- $P_c$ : فشار موئینگی آب لابلای الیاف
- $P_{sat}$ : فشار اشباع بخار آب
- $P_v$ : فشار بخار آب
- $P_w$ : فشار آب
- $Q_{cr.sk}$ : نرخ انتقال حرارت از هسته به پوست
- $RH$ : رطوبت نسبی در هر نقطه از لباس
- $R_{sk}$ : نرخ انتقال حرارت از پوست به محیط از طریق تشعشع
- $\bar{R}$ : متوسط ثابت گازها
- $S_{cr}$ : ذخیره حرارت در مرکز بدن
- $S_{sk}$ : ذخیره حرارت در پوست
- $T$ : دما
- $T_{cr}$ : دمای مرکز بدن
- $T_{sk}$ : دمای پوست
- TSENS: شاخص احساس حرارتی
- $U$ : سرعت حرکت توده ای بخار آب درون لباس
- $U_w$ : سرعت تخلیه حجمی آب درون لباس
- $W$ : کار اعضای بدن

**نمادهای یونانی**

- $\beta$  : ضریب جذب تشعشع الیاف  
 $\Gamma$  : نرخ کلی جذب رطوبت در الیاف و تغییر فاز  
 $\Gamma_{ce}$  : نرخ تغییر فاز  
 $\Gamma_s$  : نرخ جذب رطوبت  
 $\varepsilon$  : ضریب تخلخل لباس  
 $\varepsilon'$  : ضریب تخلخل لباس در حالت خشک  
 $\xi_1$  و  $\xi_2$  : ضریب صدور محیط  
 $\lambda$  : حرارت نهان تغییر فاز یا جذب الیاف  
 $\mu_g$  : ویسکوزیته بخار آب  
 $\mu_w$  : ویسکوزیته آب  
 $\rho$  : چگالی الیاف  
 $\rho_w$  : چگالی آب  
 $\sigma$  : ثابت بولتزمان  
 $\sigma'$  : کشش سطحی الیاف  
 $\tau_c$  : ضریب پیچ و خم موثر الیاف  
 $\omega$  : درصد تجمع آب  
 $\omega_f$  : درصد تجمع آب درون الیاف  
 $\tilde{\omega}$  : درصد تجمع آب در فضای خالی لباس

**Abstract**

The all of the human body thermal models suppose, evaporation occur for the whole of sweat on the skin and disregard sweat absorption effects by clothing on the evaporation rate. In this paper analyzed effective parameters on the thermal comfort with the modeling of the effective mechanisms on the heat and mass transfer specially evaporation in clothing. In one section, presented results of physically and structural parameters effects on the clothing evaporation rate and wetness, this results illustrate that parameters has a greatly effect on the evaporative dissipation. In section two, comfort quantities are considered, Results indicate these parameters considerably related to clothing type and ambient condition.