



ارزیابی تأثیرات نحوه چیدمان لایه‌های یک لباس متخلخل بر انتقال حرارت و جرم از بدن در شرایط سرما

حسن حسن‌زاده¹، سید علیرضا ذوالفقاری^{2*}، حسین شریعتی ایوری³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، zolfaghari@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 مهر 1393

پذیرش: 23 آبان 1393

ارائه در سایت: 09 آذر 1393

کلید واژگان:

لباس

انتقال جرم و حرارت

محیط متخلخل

شرایط سرما

انجام فعالیت در هوای سرد، اگر چه موجب بالا رفتن دمای بدن می‌شود، اما می‌تواند با افزایش نرخ تعرق و جمع شدن آب در بافت لباس عاملی مهم در بروز ناراحتی حرارتی در فرد به حساب آید. علاوه بر این، آب جمع شده در سطح داخلی لباس می‌تواند سبب اختلال در تنفس پوست بدن شود. لذا میزان آب جمع شده و رطوبت سطح داخلی شاخص‌های مهمی برای ارزیابی مناسب بودن لباس برای فعالیت زمستانه می‌باشد. هدف از این تحقیق، تعیین مقدار آب جمع شده در آرایش‌های متفاوت یک لباس چند لایه، متشکل از سه لایه بافت اصلی با ترکیب ویسکوز و پلی‌استر در یک محیط بسیار سرد (20- درجه سلسیوس) است. برای این منظور، لباس به عنوان یک محیط متخلخل، با جریانی چند فازی و چند گونه‌ای به همراه میعان و جذب مورد مدل‌سازی قرار گرفته است. همچنین به منظور گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم، از روش عددی حجم محدود ضمنی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری بافت غیر جاذب پلی‌استر در لایه نزدیک به پوست، موجب کم شدن تری لباس در این ناحیه می‌شود. همچنین، قرارگیری پلی‌استر در لایه خارجی می‌تواند به حفظ شرایط دمایی مطلوب برای لباس کمک نماید. ضمن اینکه نتایج نشان داد که استفاده از بافت ویسکوز در لایه میانی لباس می‌تواند منجر به کاهش تجمع آب در مرکز لباس شود. بنابراین، آرایش پلی‌استر-ویسکوز-پلی‌استر با دارا بودن کمترین مقدار برای شاخص تجمع آب در مرکز داخلی (0/02) و بیشترین مقادیر برای دمای مرز داخلی (33 درجه سلسیوس) و دمای متوسط لباس (16/1 درجه سلسیوس) می‌تواند علی‌رغم ایجاد شرایط حرارتی و دمایی مناسب، جرم آب ناشی از تعرق را به خوبی از سمت پوست به محیط دفع نماید.

Evaluating the effects of layer arrangement of a porous clothing on heat and mass transfer from the body under cold conditions

Hasan Hasanzadeh¹, Alireza Zolfaghari^{1*}, Hosein Shariati Eivari¹

1- 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 14 October 2014
Accepted 14 November 2014
Available Online 30 November 2014

Keywords:

Clothing
Heat and mass transfer
Porous media
Cold condition

ABSTRACT

Although, the physical activity in the cold condition causes the body temperature to rise, it can be a significant factor in the occurrence of thermal discomfort due to increase in the perspiration rate and water gathering in the fabric. Moreover, the accumulated water at the inner side of the clothing can cause a difficulty in the skin respiration. So, the amount of accumulated water and interior surface wetness are important indices for evaluating the suitability of clothing for winter activity. The aim of this study is to determine the amount of accumulated water in various arrangements of multi-layer clothing assemblies containing of three bathing layers of Polyester and Viscose in a very cold environment (with -20°C temperature). For this reason, the clothing has been modeled as a porous media with multi-phases and multi-species flow by considering the sorption and condensation phenomena. Also, the implicit finite volume numerical method has been used for discretizing and solving the governing equations. The results show that locating the non-absorbing polyester fabric at the layer adjacent to the skin causes the wetness to decrease at this region. Also, locating the polyester at the outer layer can help to maintain the clothing temperature at the proper conditions. Also, the results indicate that using the viscose fabric as the middle layer leads to decrease in the water content value at the center of clothing. Therefore, the "polyester-viscose-polyester" arrangement can properly remove the perspiratory moisture from the skin to environment, with the minimum of inner water content index (0.02) and maximum inner surface temperature (33°C) and average clothing temperature (16.1°C).

1- مقدمه

سرما و گرما، می‌تواند به عنوان یک عامل تعیین کننده، میزان عبور و دفع

لباس به عنوان یک پوشش محافظ، علاوه بر حفاظت از بدن انسان در برابر تعرق و تری به وجود آمده روی سطح پوست را تحت تأثیر قرار دهد. در

Please cite this article using:

H. Hasanzadeh, A. Zolfaghari, H. Shariati Eivari, Evaluating the effects of layer arrangement of a porous clothing on heat and mass transfer from the body under cold conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 194-202, 2015 (In Persian)

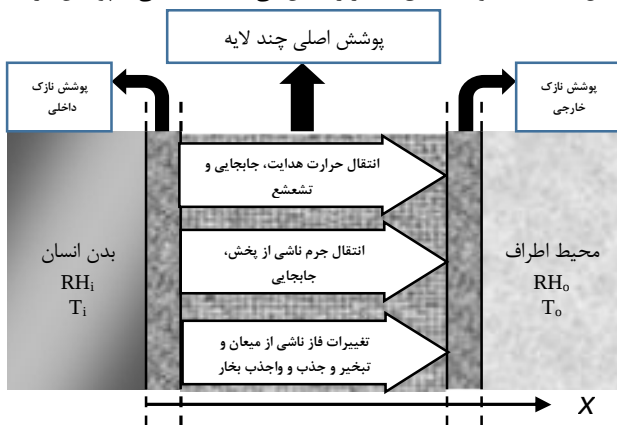
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

لایه پوششی نازک در اطراف و یک بافت متخلخل ضخیم در وسط این دو لایه بود. نتایج آزمایشگاهی آنها برای دو نمونه بافت اصلی متخلخل مختلف و دو نمونه متفاوت لایه پوششی ارائه گردید. در سال 2004، فن و همکارانش [7] مجدداً یک مدل‌سازی عددی را برای انتقال جرم و حرارت با استفاده از معادله هرتز- ندسون جهت محاسبه میعان و همچنین در نظر گرفتن حرکت بخار آب تحت تأثیر اختلاف فشار بخار ارائه نمودند. در سال 2007، هوانگ و همکارانش [8]، موضوع انتقال حرارت و جرم را با در نظر گرفتن معادله‌ای برای هوای موجود در لباس به روش تفاضل محدود ارائه دادند. در سال 2008، وو و فن [9]، نتایج مربوط به انتقال حرارت و انتقال جرم را برای چهار آرایش متفاوت پوششی ارائه نمودند. آن‌ها با در نظر گرفتن دو جنس متفاوت ویسکوز و پلی‌استر، چهار آرایش متفاوت را مدل‌سازی نمودند. همچنین در سال 2013، پاسدار و همکارانش [10] به تحلیل پارامترهای مؤثر بر آسایش حرارتی افراد با مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم از یک لباس تک لایه متخلخل پرداختند و از این طریق، عملکرد مدل استاندارد آسایش حرارتی گایج را از نظر نحوه مدل‌سازی لباس ارتقا بخشیدند.

در سال‌های اخیر تولیدکنندگان پوشاک با طراحی و تولید لباس‌هایی متشکل از چندین لایه مختلف به جای یک لایه ثابت، به این نتیجه رسیدند که استفاده از مزایای پوشش‌های مختلف در کنار یکدیگر، شرایط مناسب‌تری را برای لباس به وجود می‌آورد. اما نحوه چینش و قرارگیری این لایه‌ها موضوع مهمی است که به لحاظ پژوهشی چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. موضوع انتقال حرارت و جرم در لباسی با ترکیب لایه‌های متفاوت، تنها در سال 2008 توسط وو و فن [9] مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان انتقال جرم و حرارت را برای یک لباس دو لایه با ترکیب لایه‌های متفاوت پشم و پلی‌استر به ازای دو آرایش متفاوت در دمای 20- درجه سلسیوس مورد بررسی قرار دادند. اما با این وجود، تا کنون تأثیر آرایش‌های مختلف برای چینش لایه‌های لباس بر شاخص‌های عملکردی مؤثر بر آسایش حرارتی افراد مورد بررسی قرار نگرفته است. بر این اساس، در تحقیق حاضر سعی شده است تا میزان تأثیرگذاری آرایش لایه‌های یک لباس 3 لایه، بر شاخص تجمع آب در نزدیکی پوست، دمای مرز داخلی لباس و دمای متوسط لباس مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد و مناسب‌ترین آرایش برای ترکیب لایه‌های مختلف در شرایط انجام فعالیت در سرما معرفی گردد.

2- مفروضات و معادلات حاکم

شکل 1 فضای نمونه تحقیق حاضر را نشان می‌دهد که لباسی با پوشش نازک



شکل 1 فضای نمونه در مدل‌سازی لباس

شرایط گرم، نرخ تعرق از بدن بالا است و لذا لباس باید حرارت تولید شده و نیز آب ناشی از تعرق را به محیط دفع نماید. بر این اساس، در شرایط گرم هر چه مقاومت لباس در برابر انتقال حرارت و انتقال جرم کمتر باشد، آن لباس مناسب‌تر خواهد بود. این در حالی است که انتخاب لباس مناسب در شرایط سرما، با چالش‌های بیشتری روبه‌رو است. به بیان دیگر، در شرایط سرما هر چه میزان مقاومت حرارتی لباس بیشتر باشد، بدیهی است که میزان دفع حرارت از بدن کمتر خواهد بود و این امر به حفظ شرایط حرارتی مناسب برای بدن کمک خواهد کرد. اما نکته حائز اهمیت این است که اگر به دلیل وجود فعالیت بدنی، نرخ تعرق افراد زیاد باشد، بایستی لباس به گونه‌ای طراحی و انتخاب شود که علیرغم مقاومت حرارتی زیاد، بتواند به راحتی آب حاصل از تعریق را از سطح پوست به محیط دفع نماید و مانع از ایجاد نارضایتی ناشی از تری پوست در افراد شود. به عنوان مثال، در طراحی و انتخاب لباس زمستانی مناسب برای ورزشکاران باید دقت کرد که علاوه بر مقاومت حرارتی مناسب که برای جلوگیری از دفع حرارت بدن مورد نیاز است، باید لباس بتواند جرم حاصل از تعریق را به خوبی از سطح پوست دفع کند. بر این اساس، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تعیین میزان آب جمع شده در لباس، هم در شرایط گرما و هم سرما از اهمیت بالایی برخوردار است. به طور کلی، در شرایطی که میزان تعرق - چه به دلیل فعالیت بدنی و چه به علت گرم بودن محیط - زیاد باشد، مقدار قابل توجهی آب در لباس جمع می‌شود و این آب جمع شده، به عنوان مقاومتی در مسیر عبور جریان حرارت و جرم از بدن عمل می‌کند و موجب نارضایتی حرارتی فرد می‌شود. همچنین با انجام فعالیت‌های سنگین و افزایش متابولیک بدن در شرایط سرد، نرخ تعرق افزایش یافته و آب حاصل از تعریق وارد بافت لباس می‌شود و پس از توقف فعالیت و کاهش متابولیک، آب جمع شده با جذب حرارت از بدن، تبخیر شده و دمای بدن در زمان استراحت کاهش می‌یابد که این امر سبب نارضایتی حرارتی و بیماری فرد می‌گردد. بر اساس آنچه که گفته شد، تعیین خواص مربوط به انتقال حرارت و جرم از پوششی که بتواند موجب ایجاد کمترین نارضایتی حرارتی شود، جهت طراحی لباس از اهمیت بالایی برخوردار است.

به منظور مدل‌سازی انتقال حرارت و جرم از لباس، بایستی بافت لباس به عنوان یک محیط متخلخل مورد تحلیل قرار گیرد و شرایط مربوط به عبور بخار آب، هوا، آب و حرارت در لباس مورد بررسی قرار گیرد. انتقال حرارت و جرم در یک محیط متخلخل جاذب برای اولین بار توسط هنری [1] در سال 1939 مورد مطالعه قرار گرفت. وی پخش بخار آب در هوا از درون منافذ یک محیط متخلخل جامد به همراه پدیده جذب را مورد بررسی قرار داد. اگنویکس و تین [2] در سال 1980 شرایط پایایی یک پوشش عایق متخلخل را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در سال 1990، شاپیرو و معتکف [3]، تحقیقات اگنویکس و تین را برای یک بافت متخلخل در حالت ناپایا و با استفاده از حل تحلیلی ادامه داده و نتایج آزمایشگاهی را نیز ارائه کردند. در سال 2000 فن و همکارانش [4]، انتقال حرارت و جرم را همراه با جذب و میعان، در یک پوشش لباس متخلخل به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. در این مدل برای اولین بار تأثیر میزان آب جمع شده بر ضریب هدایت حرارتی لحاظ شد. در سال 2002، فن و ون [5]، با ادامه روند مطالعات خود، به مدل‌سازی ناپایایی انتقال حرارت و جرم همراه با پدیده جذب و همچنین میعان متحرک پرداختند. در سال 2003، فن و همکارانش [6] مدل‌سازی آزمایشگاهی یک پوشش عایق را به منظور محاسبه میزان جذب و میعان در دماهای پایین انجام دادند. نمونه آزمایشگاهی آنان مشتمل بر دو

2-3- معادله بقای جرم برای بخار آب و هوا

معادله انتقال جرم برای بخار آب بصورت رابطه (9) است [11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon C_v) + \frac{\partial}{\partial x}(u_g \epsilon C_v) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{g\epsilon}}{\tau_c} C \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_v}{C} \right) \right] - \Gamma \quad (9)$$

و معادله انتقال جرم برای هوا مشابه بخار آب بصورت رابطه (10) است [11].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon C_a) + \frac{\partial}{\partial x}(u_g \epsilon C_a) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_{g\epsilon}}{\tau_c} C \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_a}{C} \right) \right] \quad (10)$$

در بسیاری از مسائل مربوط به انتقال جرم و حرارت، از معادله فشار به جای معادله بقای جرم هوا استفاده می‌شود [11, 12] با جمع کردن طرفین روابط (9) و (10) و با توجه به این که $C = C_v + C_a$ و $P = RCT$ می‌توان نوشت رابطه (11):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\epsilon}{RT} P \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(u_g \epsilon \frac{P}{RT} \right) = -\Gamma_{ce} - \Gamma_s \quad (11)$$

رابطه (11) برای تعیین فشار کل که مجموع فشارهای جزئی هوا و بخار آب است استفاده می‌شود.

2-4- معادله بقای جرم آب مایع

چنانچه اشاره شد میزان آب موجود در بافت لباس، به دو قسمت آب جذبی و آب آزاد تقسیم می‌شود. آب آزاد مقدار آبی است که در لایه‌لای منافذ لباس بوده و آب جذبی مقدار آب جذب شده در الیاف لباس است. معادله انتقال آب آزاد به صورت رابطه (12) می‌باشد [9].

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho(1-\epsilon)\tilde{W}] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho(1-\epsilon)D_l \frac{\partial \tilde{W}}{\partial x} \right) + M_{\text{molg}} \Gamma_{ce} \quad (12)$$

مقدار کل آب، از جمع کردن دو مقدار آب آزاد و آب جذبی محاسبه می‌گردد.

$$W = \tilde{W} + W_f \quad (13)$$

که مقدار آب جذبی از رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$W_f = \frac{MC_f}{\rho} = \frac{2M}{\rho R_f^2} \int_0^{R_f} C_f r dr \quad (14)$$

لازم به ذکر است که W یک شاخص بی‌بعد مهم برای نشان دادن مقدار آب موجود در لباس است و اصطلاحاً تحت عنوان «شاخص تجمع آب» شناخته می‌شود. در واقع، این شاخص بیانگر نسبت جرم آب موجود در لباس به جرم لباس خشک است و می‌تواند مقداری کمتر یا بیشتر از 1 داشته باشد.

2-5- معادله به حرکت مخلوط گاز در منافذ لباس

بخار آب موجود در لباس، به دلیل اختلاف فشار حرکت می‌کند. در محیط‌های متخلخل می‌توان جهت سادگی، به جای استفاده از معادلات پیچیده حرکت سیال، از رابطه معروف داری برای تعیین سرعت مخلوط گاز استفاده نمود (رابطه (14')).

$$u_g = -\frac{k_s k_{rg}}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial x} \quad (14')$$

که در رابطه (14') P_g فشارمخلوط گاز است که با مجموع فشار بخار و فشار هوا برابر است (رابطه (15)).

$$P_g = P_v + P_a \quad (15)$$

همچنین k_{rg} نفوذ پذیری نسبی است که تابعی از مقدار اشباع است [12].

$$k_{rg} = (1-s)^3 \quad (16)$$

ضمن اینکه مقدار اشباع را می‌توان به کمک رابطه (17) محاسبه کرد [12].

$$s = \frac{(1-\epsilon)\rho\tilde{W}}{\epsilon'\rho_w} \quad (17)$$

2-6- شرایط مرزی و اولیه

به منظور حل معادلات حاکم، لازم است تا شرایط مرزی برای هر کدام از معادلات در دو سمت لباس مشخص شود. شرایط مرزی برای معادله انتقال حرارت در مرزهای داخلی و خارجی به ترتیب به صورت روابط (18) و (19)

داخلی، بافت اصلی و پوشش نازک خارجی است که از یک سو با بدن و از سوی دیگر با شرایط محیطی اطراف در ارتباط می‌باشد.

- مهمترین فرضیات حاکم بر مدل‌سازی لباس در تحقیق حاضر عبارتند از:
 - بافت لباس به عنوان یک محیط متخلخل همگن در نظر گرفته شده است.
 - تغییرات حجم لباس ناشی از جمع شدن آب در آن، ناچیز است.
 - با توجه به حیطه دمایی کارکرد لباس، در دماهای کم (در ناحیه انجماد) تنها تصعید و چگالش اتفاق می‌افتد.
 - بین فازهای مختلف آب و گونه‌های متفاوت، تعادل حرارتی وجود دارد.
- معادلات حاکم شامل معادلات بقای انرژی، معادلات بقای جرم برای هوا و بخار آب، معادلات حرکت و جذب آب در لباس و معادلات مربوط به چشمه میعان و جذب است.

2-1- معادله بقای انرژی

معادله (1) معادله انتقال حرارت غیر دائم در بافت لباس است [11, 12].

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_{vt}T) + \frac{\partial}{\partial x}(u_g \epsilon C_{vg}T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + M_{\text{molg}} \Gamma \quad (1)$$

که k_t ضریب هدایت حرارتی موثر لباس بوده و توسط رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$k_t = \epsilon k_g + (1-\epsilon) \left(k_f + \frac{\rho}{\rho_w} W k_w \right) / \left(1 + \frac{\rho}{\rho_w} W \right) \quad (2)$$

که C_{vt} در رابطه (1) ظرفیت حرارتی موثر بوده و به صورت مشابه از رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$C_{vt} = \epsilon C_{vg} + (1-\epsilon) \left(C_{vf} + \frac{\rho}{\rho_w} W C_{vw} \right) / \left(1 + \frac{\rho}{\rho_w} W \right) \quad (3)$$

ϵ' به عنوان ضریب تخلخل لباس در حالت خشک معرفی شده که به صورت نسبت حجم خالی لباس به حجم کل تعریف می‌گردد. آب جمع شده در لباس، حجم خالی لباس را پر کرده و بنابراین ضریب تخلخل با جمع شدن آب تغییر می‌کند، بنابراین ϵ به عنوان ضریب تخلخل موثر در بافت لباس معرفی می‌گردد که مطابق رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$\epsilon = \epsilon' - \frac{\rho}{\rho_w} \tilde{W} (1 - \epsilon') \quad (4)$$

چنانچه در روابط 2، 3 و 4 مشاهده می‌گردد مشخصه‌های ضریب هدایت حرارتی موثر و ظرفیت حرارتی موثر به مقدار آب کل (W) وابسته است در حالی که شاخص ضریب تخلخل موثر تنها به مقدار آب جمع شده در منافذ خالی لباس یا آب آزاد ($\tilde{W}$) وابسته است.

2-2- معادلات چشمه میعان و تبخیر

مشخصه Γ در معادله (1) نشان‌دهنده چشمه میعان و تبخیر بوده که به دو بخش چشمه جذبی و میعان تقسیم می‌شود. چشمه جذبی نرخ جذب توسط الیاف لباس بوده و چشمه میعان نرخ میعان و تبخیر در لباس است. از رابطه هرتز-ندسون (رابطه 5) می‌توان جهت محاسبه چشمه مربوط به میعان و تبخیر استفاده کرد [11].

$$\Gamma_{ce} = -\frac{E}{R_f} \sqrt{\frac{(1-\epsilon)(1-\epsilon')}{2\pi RM}} \left(\frac{P_{\text{sat}} - P_v}{\sqrt{T_s}} \right) \quad (5)$$

همچنین رابطه (6) معادله حاکم بر نفوذ بخار آب در الیاف لباس را نشان می‌دهد. رابطه (7) میزان بخار آب جذب شده و رابطه (8) نرخ مربوط به جذب بخار در الیاف را نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial C_f'}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_f r \frac{\partial C_f'}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$C_f = \frac{2}{R_f^2} \int_0^{R_f} C_f' r dr \quad (7)$$

$$\Gamma_s = (1-\epsilon') \frac{\partial C_f}{\partial t} \quad (8)$$

است.

$$u_g \in C_{vt} T \Big|_{x=0} - k_t \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{(T|_0 - T^i)}{R_t^i + 1/H_t^i} + M_{\text{molv}} C_{vv} \frac{(C_{v|0} - C_v^i)}{R_v^i + 1/H_v^i} T + M_{\text{mola}} C_{va} \frac{(C_{a|0} - C_a^i)}{R_a^i + 1/H_a^i} \quad (18)$$

$$u_g \in C_{vt} T \Big|_{x=L} - k_t \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{(T|_L - T^o)}{R_t^o + 1/H_t^o} + M_{\text{molv}} C_{vv} \frac{(C_{v|L} - C_v^o)}{R_v^o + 1/H_v^o} T + C_{va} \frac{(C_{a|L} - C_a^o)}{R_a^o + 1/H_a^o} T \quad (19)$$

با توجه به غیر دائم بودن مسئله بایستی شرط اولیه مشخص شود. رابطه (20) نیز شرط اولیه برای معادله انتقال حرارت را نشان می‌دهد.

$$T_{\text{ini}} = T \quad (20)$$

روابط (21) و (22) شرایط مرزی معادله مربوط به بقای جرم بخار آب را به ترتیب برای مرزهای داخلی و خارجی و رابطه (23) شرایط اولیه را نشان می‌دهند.

$$u_g \in C_v \Big|_0 - \frac{D_g \epsilon}{\tau_c} C \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_v}{C} \right) \Big|_{x=0} = \frac{(C_{v|0} - C_v^i)}{R_v^i + 1/H_v^i} \quad (21)$$

$$u_g \in C_v \Big|_L - \frac{D_g \epsilon}{\tau_c} C \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_v}{C} \right) \Big|_{x=L} = \frac{(C_{v|L} - C_v^o)}{R_v^o + 1/H_v^o} \quad (22)$$

$$C_v = RH_{\text{ini}} \frac{P_{\text{sat}}(T_{\text{ini}})}{RT_{\text{ini}}} \quad (23)$$

شرایط مرزی برای معادله فشار، نیز از جمع کردن شرایط مرزی برای دو معادله حاکم بر انتقال بخار و هوا به دست می‌آید که به صورت معادلات (24) و (25) به ترتیب برای مرزهای داخلی و خارجی است.

$$u_g \in \frac{P}{RT} \Big|_{x=0} = \frac{(C_{a|0} - C_a^i)}{R_a^i + 1/H_a^i} + \frac{(C_{v|0} - C_v^i)}{R_v^i + 1/H_v^i} \quad (24)$$

$$u_g \in \frac{P}{RT} \Big|_{x=L} = \frac{(C_{v|L} - C_v^o)}{R_v^o + 1/H_v^o} + \frac{(C_{a|L} - C_a^o)}{R_a^o + 1/H_a^o} \quad (25)$$

رابطه (26) نیز فشار اولیه را نشان می‌دهد.

$$P_{\text{ini}} = P_{\text{atm}} + RH_{\text{ini}} P_{\text{sat}}(T_{\text{ini}}) \quad (26)$$

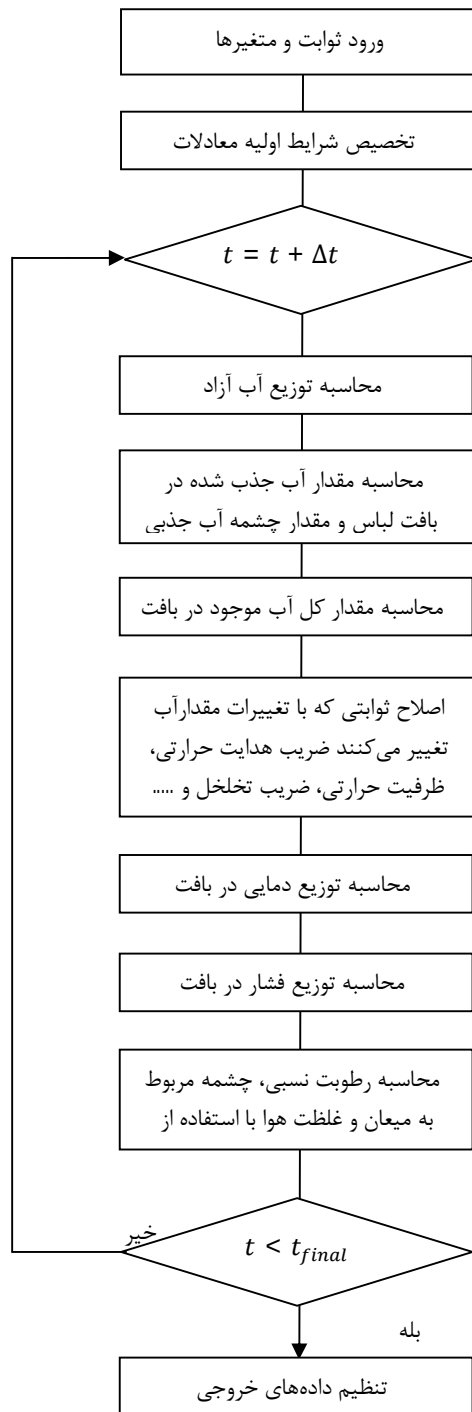
3- روش حل

معادلات حاکم توسط روش حجم محدود خطی شده و توسط روش‌های عددی حل شده است. همچنین، شبکه مورد استفاده جهت حل، یک بعدی در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه، استقلال حل از شبکه محاسباتی و گام زمانی به دقت مورد بررسی قرار گرفته و شبکه‌ای یکنواخت با 100 گره مکانی و نیز فواصل زمانی 0/1 ثانیه برای حل انتخاب شده است. شکل 2 طرحواره‌ای از روند کلی حل عددی را نشان می‌دهد.

مقدار دما و رطوبت نسبی در مرز داخلی لباس (روی سطح پوست) به ترتیب برابر با 33 درجه سلسیوس و 100% در نظر گرفته شده است. همچنین، در مرز خارجی (محیط)، مقدار رطوبت نسبی 90% و دما 20- درجه سلسیوس انتخاب شده است. لباس مورد بررسی در تحقیق حاضر، شامل یک پوشش سه لایه است که از ترکیب چینش‌های ممکن از دو جنس مختلف (ویسکوز و پلی‌استر) به وجود آمده است. بر این اساس، 8 آرایش مختلف برای لباس، مطابق با جدول 1 در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مقاومت حرارتی لباس در تمامی حالات هشت‌گانه فوق، با هم برابر بوده و مطابق با یک لباس ضخیم زمستانه، مقداری در حدود 2clo دارد. (0/31m²k/w)

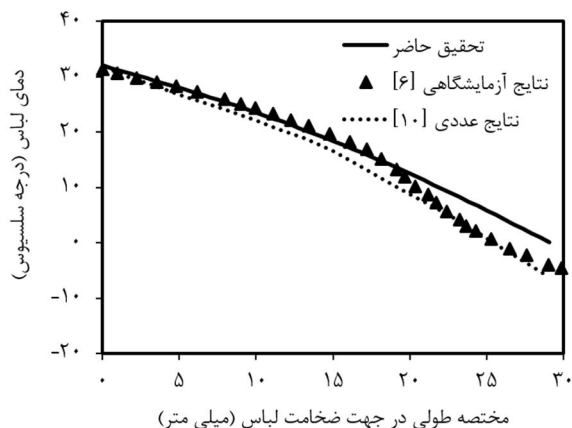
جدول 1 ترکیب آرایش‌های مختلف لباس مورد استفاده در تحقیق حاضر

شماره آرایش	کد شناسه	لایه خارجی	لایه میانی	لایه داخلی
1 آرایش	VVV	ویسکوز	ویسکوز	ویسکوز
2 آرایش	PPP	پلی‌استر	پلی‌استر	پلی‌استر
3 آرایش	VVP	پلی‌استر	ویسکوز	ویسکوز
4 آرایش	VPV	ویسکوز	پلی‌استر	ویسکوز
5 آرایش	PVV	ویسکوز	ویسکوز	پلی‌استر
6 آرایش	PPV	ویسکوز	پلی‌استر	پلی‌استر
7 آرایش	PVP	پلی‌استر	ویسکوز	پلی‌استر
8 آرایش	VPP	پلی‌استر	پلی‌استر	ویسکوز

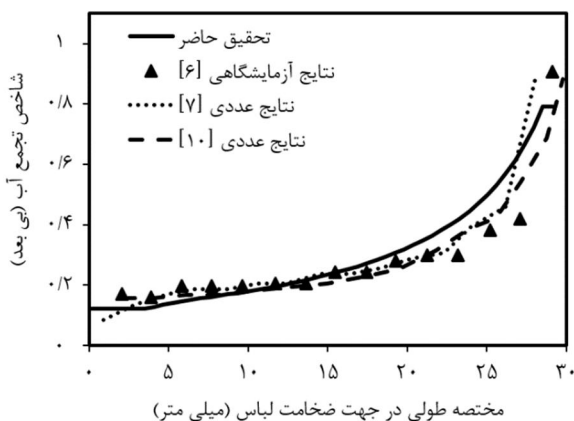


شکل 2 طرحواره روند کلی حل عددی در تحقیق حاضر

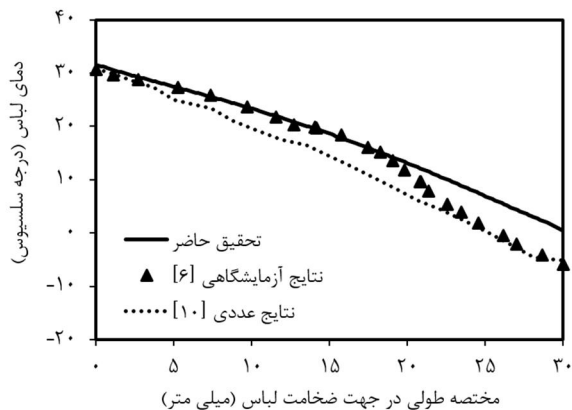
شایان ذکر است که یافتن منشأ واقعی ایجاد خطا در حل‌های عددی، بسیار دشوار است. با این وجود به نظر می‌رسد که استفاده از برخی فرضیات ساده-کننده در تحقیق حاضر، از جمله فرض تعادل حرارتی میان آب و بافت لباس می‌تواند موجب اختلاف میان نتایج حل حاضر و داده‌های آزمایشگاهی باشد. البته توجه به این نکته نیز ضروری است که نتایج حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی نیز خالی از خطا نیستند و بنابراین همواره این احتمال وجود دارد که بخشی از اختلاف میان حل‌های عددی و آزمایشگاهی، مربوط به خطاهای تجربی باشد.



شکل 3 مقایسه نتایج مربوط به دما در تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی در آرایش ویسکوز-نایلون



شکل 4 مقایسه نتایج مربوط به مقدار آب جمع شده در تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی در آرایش ویسکوز-نایلون



شکل 5 مقایسه نتایج مربوط به دما در تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی در آرایش ویسکوز-لیمینیت

در جدول 2، مشخصات ترموفیزیکی مربوط به بافت ویسکوز و پلی‌استر ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب هدایت حرارتی در بافت ویسکوز، حدود $1/5$ برابر بافت پلی‌استر است. بر این اساس، به منظور اینکه مقاومت حرارتی همه آرایش‌ها کاملاً برابر باشد و امکان مقایسه نتایج مربوط به انتقال جرم در لباس به ازای مقاومت حرارتی یکسان، فراهم باشد؛ لذا ضخامت هر لایه ویسکوز 15 میلی‌متر و ضخامت هر لایه پلی‌استر 10 میلی‌متر انتخاب شده است.

4- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی معادلات و حل عددی، نتایج مدل‌سازی با داده‌های تجربی و عددی موجود در مقالات [6, 7, 11] مقایسه شده است. بر این اساس، دو آرایش متفاوت لباس با ترکیب ویسکوز به عنوان بافت اصلی و نایلون و لیمینیت به عنوان لایه پوششی در نظر گرفته می‌شود. شرایط اولیه برای دما و رطوبت نسبی در لباس، به ترتیب 20 درجه سلسیوس و 65% می‌باشد. سایر خواص و مشخصات لباس، پوشش و مشخصه‌های مورد استفاده در اعتبارسنجی، در جدول‌های 3 و 4 ارائه شده است. نتایج مربوط به اعتبارسنجی برای میزان آب جمع شده و دمای لباس برای بافت ویسکوز با دو پوشش متفاوت لیمینیت و نایلون در شکل‌های 3 تا 6 نشان داده شده است.

همچنین، جدول 5 میزان خطای مربوط به دما و مقدار آب جمع شده را در دو آرایش مختلف نشان می‌دهد. میزان خطاها نشان می‌دهد که نتایج حاصل از تحقیق حاضر با دقت قابل قبولی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک است.

جدول 2 مشخصات مربوط به بافت ویسکوز و پلی‌استر [6, 8, 11]

مشخصه	ویسکوز	پلی‌استر	واحد
ضریب تخلخل	0/951	0/993	بی بعد
ضریب پخش آب در بافت	$5/4 \times 10^{-11}$	$5/4 \times 10^{-11}$	m^2/s
ضریب پخش بخار در بافت	$1/5 \times 10^{-16}$	$1/5 \times 10^{-16}$	m^2/s
ضریب پخش بخار در گاز	$2/5 \times 10^{-5}$	$2/5 \times 10^{-5}$	m^2/s
ضریب دارسی	$1/5 \times 10^{-5}$	$1/0 \times 10^{-5}$	$m^2/Pa \cdot s$
ثابت میعان	$2/4 \times 10^{-6}$	$2/4 \times 10^{-6}$	بی بعد
ضریب هدایت حرارتی	0/15	0/1	W/mK
چگالی	1530	1390	kg/m^3
شعاع الیاف	$1/03 \times 10^{-5}$	$1/03 \times 10^{-5}$	m
ضریب پیچ و خم	1/2	1/2	بی بعد
ظرفیت حرارتی حجمی	$1/3 \times 10^6$	$1/17 \times 10^6$	J/m^3K

جدول 3 مشخصات مربوط به نایلون و لیمینیت [11]

مشخصه	نایلون	لیمینیت	واحد
چگالی	3960	4270	kg/m^3
ضریب تخلخل	0/1	0/1	بی بعد
ضخامت	$2/73 \times 10^{-4}$	$5/15 \times 10^{-4}$	m
مقاومت حرارتی	0/0315	0/0315	m^2K/W
مقاومت جرمی در مقابل نفوذ بخار	65	144	s/m
مقاومت جرمی در مقابل نفوذ هوا	524	غیر تراوا	sPa/m

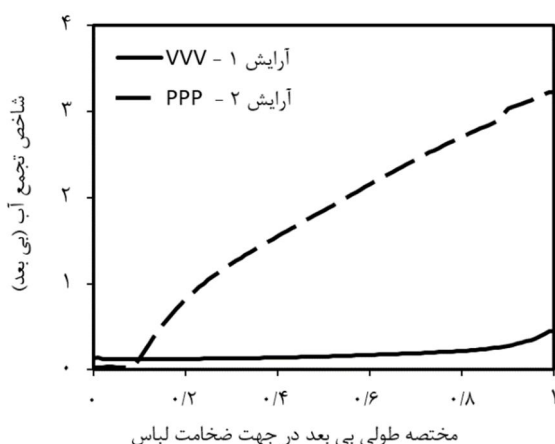
جدول 4 مقادیر مشخصه‌های مورد استفاده در حل عددی لباس [12]

مشخصه	مقدار	واحد
ضریب جابه‌جایی جرم هوا و بخار روی سطح خارجی	$2/3 \times 10^{-3}$	m/s
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی سطح خارجی	4/1	W/m^2K

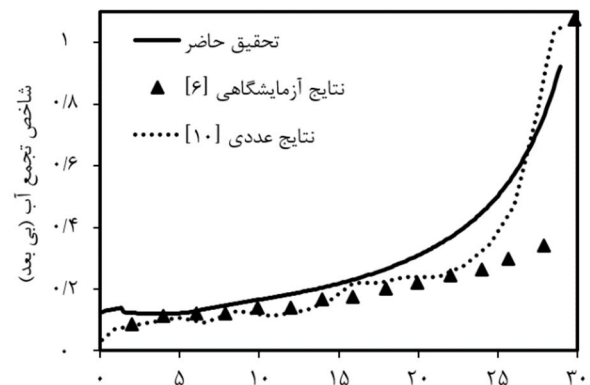
همانطور که مشاهده می‌شود، تا هنگامی که بافت لباس در شرایط مادون اشباع قرار دارد، مقدار شاخص تجمع آب در لباس با بافت پلی‌استر نسبت به بافت ویسکوز کمتر است. دلیل این امر به خاصیت غیر جاذب بودن پلی‌استر مربوط می‌شود. این در حالی است که همین خاصیت باعث می‌شود که بافت پلی‌استر بسیار سریعتر به شرایط فوق اشباع برسد و همانطور که مشاهده می‌شود، بافت پلی‌استر به جز در نزدیکی بدن که در شرایط مادون اشباع است، در سایر مکان‌ها به شرایط فوق اشباع می‌رسد و مقدار شاخص تجمع آب در آن به شدت افزایش می‌یابد. بر این اساس، به نظر می‌رسد که بافت پلی‌استر در نزدیکی سطح بدن عملکرد مناسبی دارد ولی با نزدیک‌تر شدن به محیط سرد خارج و در نتیجه کاهش دمای بافت، پلی‌استر به دلیل خاصیت غیر جاذب بودن به شرایط فوق اشباع می‌رسد و عملکرد مناسبی را نشان نمی‌دهد. لازم به ذکر است که جمع شدن آب در لباس، مانعی را در مسیر انتقال جرم و انتقال حرارت ایجاد می‌کند و موجب ناراضی‌تی افرادی می‌شود.

در شکل 8، شاخص تجمع آب در لباس‌هایی متشکل از یک لایه پلی-استر و دولایه ویسکوز به ازای آرایش‌های مختلف با هم مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد مقادیر آب در قسمت‌های بافت ویسکوز با شیب ملایم افزایش یافته و به طور کلی، مقادیر آن کم است. این در حالی است که مقادیر آب در نواحی پلی‌استری به سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. همچنین، با حرکت لایه پلی‌استری به سمت محیط سرد خارج، مقدار شاخص تجمع آب به دلیل بیشتر شدن نرخ میعان، افزایش می‌یابد. بر این اساس، شاخص تجمع آب برای آرایش 3 به حدود 2 می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که در بخشهایی از لباس، جرم آب جمع شده تا 2 برابر جرم لباس خشک نیز افزایش می‌یابد. همچنین لازم به ذکر است که مقدار دمای لباس در سطح نزدیک به بدن برای آرایش 5 بیشتر از آرایش‌های 3 و 4 است.

همچنین، در شکل 9 مقدار آب جمع شده در پوشش‌هایی با یک لایه ویسکوز و دولایه پلی‌استر (آرایش‌های 6، 7 و 8) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود روند کلی تغییرات شاخص تجمع آب در لایه‌های ویسکوز و پلی‌استر مشابه قبل است؛ با این تفاوت که به علت افزایش تعداد لایه‌های پلی‌استری، مقادیر شاخص تجمع آب تا حدی بیشتر خواهد بود. همچنین در جدول 6، میانگین مقدار آب جمع شده در لباس و همچنین شاخص تجمع آب در مرز داخلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که



شکل 7 توزیع شاخص تجمع آب در لباس به ازای آرایش 1 (هر سه لایه ویسکوز) و آرایش 2 (هر سه لایه پلی‌استر)



شکل 6 مقایسه نتایج مربوط به مقدار آب جمع شده در تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی در آرایش ویسکوز-لمینیت

جدول 5 برآورد متوسط خطای حل عددی تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی فن و همکاران [6]

متوسط خطای دما (درجه سلسیوس)	درصد خطای مقادیر تجمع آب (%)	
1/7	9	ویسکوز-نایلون
1/9	18	ویسکوز-لمینیت

5- نتایج

به منظور بررسی اثرات آرایش‌های مختلف بر تغییر شرایط حرارتی و میزان آب جمع شده در بافت لباس، 8 آرایش مختلف برای یک لباس سه لایه در نظر گرفته شده است. لازم به یادآوری است که هدف اصلی از تحقیق حاضر، ارزیابی اثرات مربوط به مشخصه‌های انتقال جرم (آب و بخار) در لباس‌هایی با آرایش‌های مختلف می‌باشد؛ لذا، به منظور اینکه مقایسه نتایج در حالت‌های مختلف، مقذور و معنی‌دار باشد، مقدار مقاومت حرارتی لباس در تمامی آرایش‌ها کاملاً برابر در نظر گرفته شده است. از این رو، ضخامت هر لایه ویسکوز برابر با 15 میلی‌متر و ضخامت هر لایه پلی‌استر معادل با 10 میلی‌متر فرض شده است. بر این اساس، مقاومت حرارتی لباس در همه آرایش‌ها برابر و معادل 2 clo ($0/31 \text{ m}^2 \text{K/W}$) خواهد بود که معادل با مقاومت حرارتی یک لباس ضخیم زمستانه است.

در شکل 7، توزیع شاخص تجمع آب در لباس به ازای آرایش‌های 1 و 2 نشان داده شده است. به منظور ارزیابی و تحلیل نتایج نمودارها، لازم است تا توضیحات بیشتری در مورد شرایط مختلف بخار در لباس ارائه شود. بر این اساس، به طور کلی سه ناحیه مختلف در بافت لباس می‌تواند اتفاق بیافتد. ناحیه اول که در آن، رطوبت نسبی کمتر از یک بوده و اصطلاحاً به ناحیه مادون اشباع معروف است. در این ناحیه مقدار آب تنها ناشی از جذب بوده و مقدار آن برای بافت ویسکوز در حال افزایش و برای بافت پلی‌استر به دلیل خاصیت غیر جاذب بودن آن ناچیز می‌باشد.

ناحیه دوم به عنوان ناحیه اشباع نامیده می‌شود. در این ناحیه رطوبت نسبی تقریباً یک است؛ بنابراین مقدار آب جمع شده در بافت ویسکوز تقریباً ثابت و برابر حداکثر مقدار قابل جذب است و برای بافت پلی‌استر ناچیز می‌باشد.

در نهایت، ناحیه سوم تحت عنوان مافوق اشباع شناخته می‌شود. در این ناحیه مقدار آب بافت به دلیل میعان برای هر دو بافت افزایش می‌یابد.

به منظور سهولت مقایسه میان حالات مختلف و انتخاب آرایش مناسب از بین همه حالات، در جدول 8 شاخص‌های مهم و تأثیرگذار برای آرایش‌های مختلف رتبه‌بندی شده است.

با نگاهی به اطلاعات موجود در جدول 8، به سادگی می‌توان دریافت که آرایش 7 نسبت به سایر آرایش‌ها از شرایط مناسب‌تری برخوردار است. ضمن اینکه با توجه به جمیع شرایط، آرایش‌های 1 و 4 نسبت به حالت‌های دیگر وضعیت بدتری دارند. به طور کلی می‌توان گفت که وجود پلی‌استر (غیر جاذب) در لایه نزدیک به بدن، موجب کم شدن تری لباس در نزدیکی پوست

جدول 6 میانگین شاخص تجمع آب و مقدار آن در مرز داخلی لباس به ازای آرایش‌های مختلف

نوع آرایش	کد شناسه	میانگین شاخص تجمع آب (بی‌بعد)	شاخص تجمع آب در مرز داخلی (بی‌بعد)
آرایش 1	VVV	0/18	0/13
آرایش 2	PPP	1/75	0/02
آرایش 3	VVP	0/49	0/13
آرایش 4	VPV	0/32	0/13
آرایش 5	PVV	0/23	0/02
آرایش 6	PPV	0/55	0/02
آرایش 7	PVP	0/65	0/02
آرایش 8	VPP	1/03	0/12

جدول 7 مقادیر بیشینه و کمینه دما در لباس و میانگین مقدار دما

نوع آرایش	کد شناسه	بیشینه دما (°C)	کمینه دما (°C)	میانگین دما (°C)
آرایش 1	VVV	32/7	-8/3	15/0
آرایش 2	PPP	32/8	-5/2	15/7
آرایش 3	VVP	32/6	-8/4	15/7
آرایش 4	VPV	32/7	-7/1	15/0
آرایش 5	PVV	32/9	-7/0	15/2
آرایش 6	PPV	32/9	-5/6	15/2
آرایش 7	PVP	33/0	-5/6	16/1
آرایش 8	VPP	32/8	-5/6	15/9

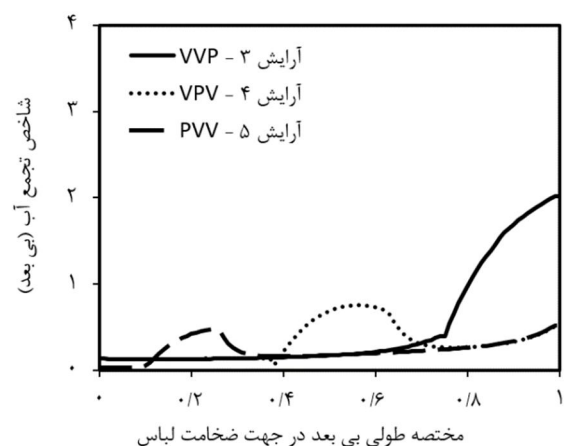
جدول 8 ترتیب آرایش‌ها بر اساس شاخص‌های معرفی شده در مقاله حاضر

نوع آرایش	کد شناسه	رتبه به ازای کمتر بودن شاخص مقدار آب در مرز داخلی	رتبه به ازای بیشتر بودن دمای لباس در مرز داخلی	رتبه به ازای بالاتر بودن دمای میانگین لباس
آرایش 1	VVV	6	6	7
آرایش 2	PPP	1★	4	3
آرایش 3	VVP	6	8	3
آرایش 4	VPV	6	6	7
آرایش 5	PVV	1★	2	5
آرایش 6	PPV	1★	2	5
آرایش 7	PVP	1★	1★	1★
آرایش 8	VPP	5	4	2

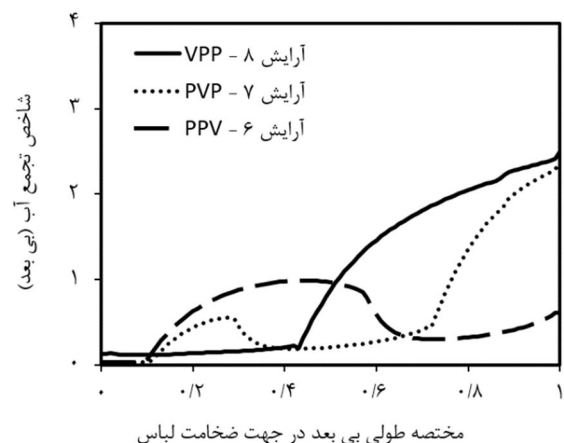
علامت ★ بیانگر بهترین آرایش در بین حالات مختلف است.

هر چه تعداد لایه‌های ویسکوز بیشتر و به محیط خارجی سرد نزدیک‌تر باشد، مقدار میانگین شاخص تجمع آب در لباس کمتر خواهد بود. بر این اساس، به ترتیب آرایش‌های 1، 5 و 4 بهترین شرایط را از نظر پایین بودن آب جمع شده در لباس دارند. همچنین، از آنجایی که مقدار آب جمع شده در مرز داخلی لباس سبب کاهش تنفس پوست می‌شود، بنابراین شاخص تجمع آب در مرز داخلی لباس در جدول 6 نشان داده شده است. واضح است که هر چقدر مقدار آب جمع شده در مرز داخلی کمتر باشد شرایط مربوط به لباس بهتر می‌باشد. چنانچه در جدول 6 مشاهده می‌گردد، آرایش‌های 2، 5، 6 و 7 که در همه آن‌ها لایه مجاور بدن از جنس پلی‌استر می‌باشد، همگی دارای شرایط مناسب مشابهی هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که اگر چه پوشش ویسکوز شرایط مناسب‌تری به لحاظ مقدار میانگین آب جمع شده در لباس دارد، ولی وجود پلی‌استر در سطح داخلی لباس شرایط مناسب‌تری را به لحاظ مقدار آب در سطح داخلی ایجاد می‌کند.

جدول 7 مقادیر مربوط به بیشینه، کمینه و میانگین دما در بافت لباس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که آرایش 7 بیشترین دمای لباس در مرز داخلی و نیز بیشترین دمای متوسط را ایجاد خواهد کرد. این در حالی است که آرایش‌های 1 و 4 با مقداری در حدود 1/1 درجه سلسیوس کمتر نسبت به آرایش 7، کمترین دمای متوسط برای لباس را دارند.



شکل 8 توزیع شاخص تجمع آب در لباس به ازای آرایش‌های دارای یک لایه پلی‌استر و دو لایه ویسکوز (آرایش‌های 3، 4 و 5)



شکل 9 توزیع شاخص تجمع آب در لباس به ازای آرایش‌های دارای دو لایه پلی‌استر و یک لایه ویسکوز (آرایش‌های 6، 7 و 8)

می‌شود و نیز در صورتی که از پلی‌استر در مجاورت محیط خارجی نیز استفاده شود، بیشترین تجمع آب در لایه نزدیک به محیط اتفاق خواهد افتاد و همین امر موجب خواهد شد که دمای لباس در نزدیکی بدن تا حدودی بالاتر رود. همچنین، استفاده از ویسکوز در لایه میانی لباس موجب خواهد شد تا تجمع آب در مرکز لباس کمتر شود و امکان حرکت بخار آب از میان الیاف لباس با سهولت بیشتری فراهم شود. لذا، همانطور که نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد، چینش لایه‌های لباس مطابق با آرایش 7 (پلی‌استر-ویسکوز-پلی‌استر) می‌تواند علیرغم ایجاد شرایط حرارتی و دمایی مناسب، جرم آب ناشی از تعرق را به خوبی از سمت پوست به محیط دفع نماید.

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق تأثیر 8 آرایش مختلف بر عملکرد یک لباس چند لایه به عنوان یک محیط متخلخل به صورت چند فازی و چند گونه‌ای به همراه پدیده جذب و میعان مورد بررسی و مدلسازی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که از نقطه نظر شاخص تجمع آب در نزدیکی سطح پوست، پوشش-هایی با لایه داخلی پلی‌استر (غیرجاذب) می‌توانند عملکرد بهتری داشته باشند. همچنین، قرارگیری لایه خارجی پلی‌استر می‌تواند موجب حفظ شرایط دمایی لباس در نزدیکی سطح بدن شود. ضمن اینکه نتایج نشان داد که استفاده از بافت ویسکوز در لایه میانی لباس می‌تواند منجر به کاهش تجمع آب در مرکز لباس شده و امکان حرکت بخار آب از میان الیاف لباس را با سهولت بیشتری فراهم آورد. بنابراین، آرایش پلی‌استر-ویسکوز-پلی‌استر با دارا بودن کمترین مقدار برای شاخص تجمع آب در مرز داخلی (0/02) و بیشترین مقادیر برای دمای مرز داخلی (33 درجه سلسیوس) و دمای متوسط لباس (16/1 درجه سلسیوس) به عنوان مناسب‌ترین چینش در بین آرایشهای مورد بررسی معرفی می‌شود.

7- فهرست علائم

C	غلظت مولی (mol/m^3)
C_i'	غلظت مولی بخار جذب شده در شعاع r (mol/m^3)
C_v	ظرفیت حرارتی حجمی ($\text{J/m}^3\text{K}$)
D_f	ضریب نفوذ بخار آب درون الیاف (m^2/s)
D_g	ضریب پخش گاز درون بافت لباس (m^2/s)
D_l	ضریب پخش آب درون بافت لباس (m^2/s)
$H_{a \text{ or } v}$	ضریب انتقال جرم ناشی از جابجایی مربوط به بخار یا هوا (m/s)
h_t	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($\text{W/m}^2\text{K}$)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
k_{rg}	ضریب نفوذ پذیری نسبی (بی‌بعد).
K_s	ضریب نفوذ پذیری (m^2)
M_{mol}	جرم مولکولی (kg/mol)
P	فشار (Pa)
R_f	شعاع الیاف (m)
R_a, R_v	مقاومت جرمی پوشش‌ها برای بخار یا هوا (s/m)
RH	رطوبت نسبی
R_t	مقاومت حرارتی پوشش‌ها ($\text{K/m}^2\text{W}$)
u	سرعت متوسط گاز (m/s)
W	شاخص تجمع آب (بی‌بعد)

علائم یونانی

Γ	نرخ مولی تغییر فاز و جذب بخار بر واحد حجم ($\text{mol/m}^3\text{s}$)
Γ_{ce}	نرخ مولی بخار میعان شده بر واحد حجم ($\text{mol/m}^3\text{s}$)
Γ_s	نرخ مولی بخار جذب شده بر واحد حجم ($\text{mol/m}^3\text{s}$)
ε'	تخلخل در حالت لباس خشک (بی‌بعد)
ε	تخلخل در حالت لباس آب دار (بی‌بعد)
λ	گرمای نهان تبخیر و میعان (J/kg)
μ	لزجت مطلق (kg/ms)
τ_c	ضریب پیچ و خم لباس (بدون بعد)

زیر نویس‌ها

a	مربوط به هوا
atm	اتمسفر
f	مربوط به لباس
fr	خالی
g	مربوط به گاز
i	در سطح داخلی لباس
ini	اولیه
mol	مولی
o	در سطح بیرونی لباس
sat	مربوط به اشباع
t	مربوط به کلی
v	مربوط به بخار
va	حجمی هوا
vf	حجمی لباس
vg	حجمی گاز
vt	حجمی کل
w	مربوط به آب

8- مراجع

- [1] P. S. H. Henry, Diffusion in Absorbing Media, THE ROYAL SOCIETY, pp. 215-241, 1939.
- [2] Y. Ogniewicz, C. L. Tien, Analysis of condensation in porous insulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 3, pp. 421-429, 1981.
- [3] A. P. Shapiro, S. Motakef, Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: analytical solutions and experimental results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 1, pp. 163-173, 1990.
- [4] J. Fan, Z. Luo, Y. Li, Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 16, pp. 2989-3000, 2000.
- [5] J. Fan, X. Wen, Modeling heat and moisture transfer through fibrous insulation with phase change and mobile condensates, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 19, pp. 4045-4055, 2002.
- [6] J. Fan, X. Cheng, Y.-S. Chen, An experimental investigation of moisture absorption and condensation in fibrous insulations under low temperature, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 27, No. 6, pp. 723-729, 2003.
- [7] J. Fan, X. Cheng, X. Wen, W. Sun, An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 10-11, pp. 2343-2352, 2004.
- [8] H. Huang, C. Ye, W. Sun, Moisture transport in fibrous clothing assemblies, *J Eng Math*, Vol. 61, pp. 35-54, 2007.

- [11] C. Ye, H. Huang, J. Fan, W. Sun, Numerical study of Heat and Moisture Transfer in Textile Materials by a Finite Volume Method, *COMMUNICATIONS IN COMPUTATIONAL PHYSICS*, Vol. 4, pp. 929-948, 2008.
- [12] X. D. Hang, W. Sun, C. Ye, Finite volume solution of heat and moisture transfer through three-dimensional textile materials, *Computers & Fluids*, Vol. 57, No. 0, pp. 25-39, 2012.
- [9] H. Wu, J. Fan, Study of heat and moisture transfer within multi-layer clothing assemblies consisting of different types of battings, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 5, pp. 641-647, 2008.
- [10] E. Pasdar, M. Maerefat, A. Zolfaghari, Analysis the effective parameters on thermal comfort by modeling the heat and moisture transfer from the clothing, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, Vol. 14, No. 2, pp. 6-28, 2013. (in persian)