مجله مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16، شماره 6، ص‌ص 283-290

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی فرایند انتقال گرما و جرم در پارچه برای محلول الکترولیت

قاسم حیدری‌نژاد[1*]، محمدرضا سیدنژاد[2]، هادی پاسدارشهری[3]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115، gheidari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 04 فروردین 1395
پذیرش: 20 اردیبهشت 1395
ارائه در سایت: 12 تیر 1395

کلید واژگان:
پارچه
انتقال گرما و جرم
الکترولیت
لایه الکتریکی دوگانه

چکیده

انتقال گرما و رطوبت درون پارچه معمولا همراه با مدل‌هایی که پدیده‌های جذب و میعان سیال را در نظر می‌گیرند شبیه‌سازی می‌شوند. برای محلول الکترولیت یون‌های موجود در سیال عبوری از درون پارچه می‌توانند عامل پدیده‌ای باشند که به آن لایه الکتریکی دوگانه گفته می‌شود. در این حالت بارهای موجود روی دیواره روزنه‌های پارچه، یون‌های مخالف را جذب کرده و عبور سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای بررسی تأثیر این پدیده معادله پواسن- بلتزمن در کنار سایر معادلات حاکم حل شده است. در این پژوهش، میزان تأثیرگذاری لایه الکتریکی دوگانه مشخص و پس از آن عوامل مؤثر بر قدرت این پدیده بررسی شده است. در حل انجام شده یک سطح پارچه در تماس کامل با مایع و سطح دیگر در تماس با هوا قرار دارد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل، تغییرات دما در سطح خارجی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است که نزدیکی این دو را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که اعمال اثر لایه الکتریکی دوگانه در معادلات سبب اختلاف دما تا مقدار 20 درصد در سطح خارجی پارچه نسبت به حالت عدم درنظر گرفتن این پدید می‌شود، همچنین زمان رسیدن کل پارچه به حالت اشباع پس از اعمال لایه الکتریکی دوگانه تا بیش از پنج برابر افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش لزجت سیال اثر لایه الکتریکی دوگانه بر دمای سطح خارجی پارچه افزایش یافته است. از عوامل تأثرگذار دیگر می‌توان به تخلخل پارچه و پتانسیل زتا اشاره کرد که با توجه به محاسبات با افزایش هرکدام می‌توان اثر لایه الکتریکی دوگانه را شدت بخشید.

Numerical simulation of heat and mass transfer in textile for electrolyte solution

Ghassem Heidarinejad[1*], Mohammad Reza Seyednejad[1], Hadi Pasdarshahri[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, gheidari@Modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 23 March 2016
Accepted 09 May 2016
Available Online 02 July 2016

Keywords:
Textile
Heat and mass transfer
Electrolyte
Electric double layer

ABSTRACT

Heat and mass transfer in textiles are usually simulated using models that consider sorption and condensation. But in electrolyte solutions, ions existed in fluid passing the textile can cause a phenomenon called *electric double layer*. Charges on the textile pores will attract the ions with opposite charge which will affect the fluid flow. To investigate this effect, Poisson-Boltzmann equation is solved besides the other governing equations of the phenomenon. Net electric charge density is computed from this equation and is applied to liquid diffusion coefficient. In this research, the influence of electric double layer is shown and then the factors affecting the strength of this phenomenon have been studied. One side of the textile is thoroughly in contact with liquid and the other side is in contact with air. To validate the obtained results, temperature variations in the outer side of the textile are computed and compared with the available experimental works. There is good agreement between the results. According to the results, applying electric double layer effect in equations causes temperature difference of up to 20 percent in the outer surface of textile. In addition, time for textile full saturation when the electric double layer is considered increased more than fivefold. The results show that by reducing the viscosity of fluid the effect of electric double layer on the textile's outer surface temperature is increased. Porosity and zeta potential are other influential factors which, according to calculations, increasing each effect can accelerate the electric double layer.

1- مقدمه

هر سیالی که رسانایی الکتریکی آن بیش از آب خالص باشد الکترولیت است. از این منظر بیشتر سیالات موجود الکترولیت می‌باشند. قدرت محلول‌های الکترولیت بسته به میزان یون‌های موجود در سیال متفاوت است و با افزایش این یون‌ها قدرت محلول الکترولیت افزایش می‌یابد.

از طرفی بیشتر سطوح جامد دارای الکتریسیته ساکن هستند، که این بارها می‌توانند یک پتانسیل سطحی الکتریکی را ایجاد کنند. این بارهای الکتریکی ساکن موجود روی سطوح غیررسانا می‌توانند یون‌های موجود در محلول با بار مخالف که در اطراف این سطوح در حرکتند را به سمت خود بکشند. به چینش جدید بارهای روی سطح جامد و یون‌های مخالف در محلول که به سمت این بارها می‌آیند لایه الکتریکی دوگانه می‌گویند. پدیده لایه الکتریکی دوگانه در مسائل زیادی که مرتبط با دینامیک سیالات است از

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
Gh. Heidarinejad, M. R. Seyednejad, H. Pasdarshahri, Numerical simulation of heat and mass transfer in textile for electrolyte solution, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 283-290, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

جمله پمپ‌ها، مبدل‌های گرمایی و ... اتفاق می‌افتد.

بررسی انتقال گرما و رطوبت در پارچه متخلخل کاربردهای فراوانی در انواع زمینه‌ها از آسایش حرارتی و صنعت پوشاک گرفته تا صافی‌ها، مصالح ساختمانی و ... دارد. عبور سیال بر اثر مویینگی درون پارچه دارای مکانیزم پیچیده‌ای است که شامل انتقال گرما، رطوبت و تغییر فاز است.

نخستین تلاش‌ها در این زمینه مربوط به بررسی پخش رطوبت، در کتان است که توسط هنری [1] صورت گرفت. او با ساده‌سازی فراوان از قبیل ثابت فرض کردن تمامی ضرایب و همچنین خطی فرض کردن رابطه سیال جدب شده توسط الیاف با دما و غلظت دو معادله‌گونه و انرژی را حل کرد. نتایج او به دلیل فرضیات فراوان در موارد اندکی قابل پذیرش بود. پس از او دیوید و نوردون [2] با کاستن از ساده‌سازی‌های هنری از قبیل درنظر گرفتن رابطه نمایی برای نرخ تغییرات مایع موجود در پارچه مدل اولیه را بهبود بخشیدند. پس از آن اگنیوچ و تین [3] یک مدل شبه پایا را برای بررسی انتقال گرما و جرم به همراه میعان در عایق‌های متخلخل (که به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شدند) ارائه کردند. این مدل را شپیرو و معتکف [4] برای حل غیرپایا گسترش دادند. سال 2004 فن و همکاران [5] این مدل‌ها را با افزودن عبارت‌های مربوط به جذب رطوبت توسط الیاف کامل‌تر کردند. اخیرا در مدلی که هونگ [6] برای پوشاک ارائه کرده از مدل تک جزیی فن به مدلی چند جزیی رسیده که هوا و بخار مایع را به‌صورت جداگانه مطرح کرده است. همچنین در مدل ارئه شده توسط لی و ژو [7] انتقال جرم و گرما به‌صورت هم‌زمان با درنظر گرفتن تأثیر پدیده‌های جذب رطوبت، میعان و پخش مایع در اثر مویینگی درون پارچه بررسی شده است. که منجر به به‌دست آمدن نتایج به نسبت نزدیکی در موارد زیادی شد.

در رابطه با تأثیر پتانسیل الکتریکی و وجود میدان الکتریکی و تأثیر این پدیده‌ها بر جریان سیال در میکروکانال آثار کمی به نسبت اهمیت موضوع تا سال 2000 وجود دارد، اما در دهه اخیر محققان بسیاری به بررسی پدیده میدان الکتریکی بر سیال و به خصوص در اطراف میکروکانال پرداخته‌اند [12-8].

جین و جنسون [13] یک مدل تحلیلی از اثر الکتروجنبشی[1] بر انتقال حرارت و جریان در میکروکانال ارائه کردند. آن‌ها اثر الکتروجنبشی را در معادله ناویر- استوکس منظور کرده و عبارات تحلیلی برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به‌دست آوردند. هوانگ و سونگ [14] به بررسی تغییر خواص در جریان درون میکروکانال با درنظر گفتن برهم‌کنش‌های الکتریکی، گرمایی و هیدرو دینامیکی در گرادیان فشار ثابت پرداختند. مطالعه ایشان نشان داد که با پتانسیل زتای[2] بالای سطح جامد و حتی غلظت پایین یون‌ها در محلول، انتقال حرارت و جریان به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، همچنین ژو و لی [15] برای نخستین بار با حل معادله پویسن- بلتزمن و تأثیر دادن آن در معادلات ناویر- استوکس و انتقال جرم، مدلی برای بررسی این پدیده در پارچه ارائه کردند.

اثر مقاومتی لایه الکتریکی دوگانه را می‌توان براساس عدد بدون بعدی که متناسب با مربع ثابت دی الکتریک مایع و پتانسیل زتای سطح جامد و همچنین متناسب با عکس عبارات لزجت دینامیکی سیال، هدایت الکتریکی سیال و مربع قطر موثر روزنه‌هاست و عدد مقاومت الکتریکی نامیده می‌شود اندازه‌گیری کرد. این عدد در کار حاضر با θ نشان داده شده است. عدد مقاومت الکتریکی تابعی از خواص سیال و شرایط سطح جامد است و مقدار آن نشان‌دهنده قابل صرف‌نظر بودن یا نبودن پدیده لایه الکتریکی دوگانه در میکروکانال‌هاست.

در این پژوهش به بررسی تأثیر لایه الکتریکی دوگانه بر کسر حجمی مایع و دما، با در نظر گرفتن دو سیال الکترولیت کلرید پتاسیم (θ=8×10^{-3}) و غیر الکترولیت آب (θ=0) پرداخته، همچنین نحوه تأثیرگذاری لزجت سیال، تخلخل پارچه و پتانسیل زتا بر قدرت پدیده لایه الکتریکی دوگانه و بیان دقیق میزان تغییر اثرگذاری لایه الکتریکی دوگانه با تغییر این خواص سیال و پارچه پرداخته شده است.

2- مدل‌سازی ریاضی

در پارچه‌ها تعداد زیادی روزنه (حفره) وجود دارد که در واقع هرکدام از آن‌ها از محاصره نخ‌هایی که پارچه از آن بافته شده تشکیل شده است. جریان سیال الکترولیت درون این روزنه‌ها ناشی از مویینگی درنظر گرفته می‌شود. این روزنه‌ها دقیقا بر سطح پارچه عمود نیستند و با زاویه‌ای نسبت به سطح از یک روی پارچه به روی دیگر پارچه می‌روند. این فرض‌ها در شکل 1 مشخص شده است.

در ادامه با اثر دادن نیروی الکتروجنبشی در معادله ناویر- استوکس مدل‌سازی پدیده لایه الکتریکی دوگانه آغاز شده است. تأثیر این پدیده به‌صورت یک نیروی حجمی در معادله مومنتم قرار داده شده است [15]. همچنین با توجه به تحلیل مرتبه متغیرها ($\frac{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}{\frac{\partial}{r\partial r}\left(\frac{r\partial u}{\partial r}\right)} \sim \frac{R_f^2}{L^2} \ll 1$) می‌توان معادله را یک بعدی و در راستای شعاعی به صورت رابطه (1) نوشت.

$$\mu \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u}{\partial r}\right) = \frac{\partial P}{\partial z} - \rho_e E \qquad (1)$$

ρ_e چگالی خالص بار الکتریکی بر واحد حجم و E بردار میدان الکتریکی بر حسب ولت بر متر است.

عبارت مربوط به چگالی الکتریکی از معادله پواسن- بلتزمن که به‌صورت روابط (3,2) است محاسبه می‌گردد [16].

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \psi}{\partial r}\right) = \frac{2\chi e n_0}{\varepsilon}\sinh\left(\frac{\chi e \psi}{k_b T}\right) \qquad (2)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \psi}{\partial r}\right) = -\frac{\rho_e}{\varepsilon} \qquad (3)$$

پس از آن می‌توان از معادله مومنتم به رابطه‌ای برای ضریب پخش مایع به صورت رابطه (4) رسید [17].

$$D_l = \frac{\sigma \cos\varphi \sin^2\gamma \varepsilon_l^{3/2} d_{cmax}}{3\mu\phi^{1/2}(4\varepsilon_l + \rho_e^2 \Theta \phi)} \qquad (4)$$

$\theta = \varepsilon^2\zeta^2/(\mu\lambda d_{cmax}^2)$ عدد مقاومت الکتریکی است که این عدد قدرت میدان الکتریکی ایجاد شده توسط سطح جامد و محلول الکترولیت را نشان می‌دهد.

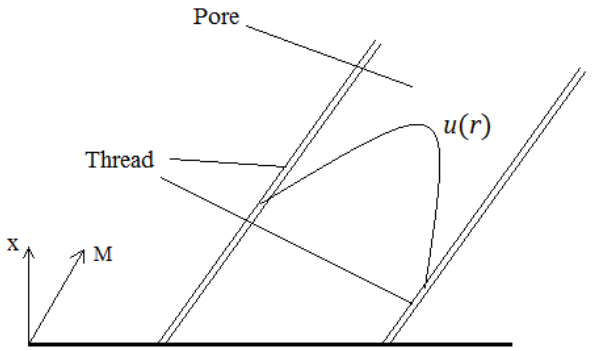

Fig. 1 A schematic of the pores and fluid movement within it

شکل 1 شماتیکی از روزنه‌ها و حرکت سیال درون آن‌ها

[1] Electro kinetic
[2] Zeta potential

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

3- معادلات حاکم

3-1- معادله پواسن- بلتزمن

از این معادله برای به‌دست آوردن پتانسیل الکتریکی و پس از آن چگالی بار برای بررسی تأثیر آن در ضریب پخش در معادله انتقال جرم برای مایع استفاده می‌شود.

شکل بدون بعد معادله پویسن- بلتزمن به‌صورت رابطه (5) است [15].

$$\frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(r\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}}\right) = \beta \sinh(\alpha\bar{\psi}) \tag{5}$$

همچنین چگالی بار الکتریکی از رابطه (6) قابل محاسبه است.

$$\bar{\rho}_e = \frac{1}{\bar{r}}\frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(r\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{r}}\right) \tag{6}$$

که از روابط (7-9) برای بی‌بعدسازی این معادلات استفاده شده است.

$$\bar{r} = \frac{r}{r_C}, \bar{\psi} = \frac{\psi}{\zeta}, \bar{\rho}_e = \frac{\rho_e}{-\varepsilon\zeta/r_C^2} \tag{7}$$

$$\alpha = \frac{\chi e\zeta}{k_b T}, \beta = \frac{(\kappa r_C)^2}{\alpha} \tag{8}$$

$$\lambda_D = \frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{k_b T}{2n_0 e^2 \chi^2}} \tag{9}$$

که برای این معادله شرایط مرزی به‌صورت رابطه (10) است.

$$\begin{cases} \bar{r} = 0 \rightarrow \dfrac{d\bar{\psi}}{d\bar{r}} = 0 \\ \bar{r} = 1 \rightarrow \bar{\psi} = 1 \end{cases} \tag{10}$$

3-2- معادله تعادل جرمی مایع

با در نظر گرفتن عبارت‌های مربوط به جذب مایع توسط الیاف و تبخیر/ میعان معادله تعادل جرمی مایع به‌صورت رابطه (11) نوشته می‌شود [7].

$$\frac{\partial(\rho_l\varepsilon_l)}{\partial t} + \bar{\omega}_l\frac{\partial C_f\varepsilon_f}{\partial t} + h_{l\leftrightarrow g}S_v\left(C^*(T) - C_g\right) = \frac{1}{\tau_l}\frac{\partial}{\partial x}\left[D_l\frac{\partial(\rho_l\varepsilon_l)}{\partial x}\right] \tag{11}$$

عبارت $\partial(\rho_l\varepsilon_l)/\partial t$ تغییرات مقدار مایع در پارچه نسبت به زمان را اندازه‌گیری می‌کند.

عبارت $\bar{\omega}_l\partial C_f\varepsilon_f/\partial t$ تغییرات مقدار مایع قابل انتقال را که با جذب (یا آزاد شدن) توسط الیاف پارچه کم (یا زیاد) می‌شود نشان می‌دهد.

عبارت $h_{l\leftrightarrow g}S_v\left(C^*(T) - C_g\right)$ تغییرات مقدار مایع موجود در پارچه را با تبخیر یا میعان شدن آن نشان می‌دهد.

عبارت $(\partial[D_l\partial(\rho_l\varepsilon_l)/\partial x]/\partial x)/\tau_l$ نشان‌دهنده تغییرات مقدار سیال با انتقال مایع درون پارچه است.

همان‌طور که در رابطه ضریب پخش برای تعادل مایع نشان داده شد ضریب پخش خود تابعی از کسر حجمی مایع (ε_l) است و سبب غیرخطی شدن معادله می‌شود.

3-3- معادله تعادل جرمی بخار

با درنظر گرفته شدن عبارت‌های مربوط به جذب رطوبت توسط الیاف (عبارت دوم در سمت چپ) و تبخیر/ میعان (عبارت سوم در سمت چپ) برای هوای درون فضای خالی پارچه، معادله تعادل جرمی بخار به‌صورت رابطه (12) درمی‌آید [7].

$$\frac{\partial(C_g\varepsilon_g)}{\partial t} + \bar{\omega}_g\frac{\partial C_f\varepsilon_f}{\partial t} - h_{l\leftrightarrow g}S_v\left(C^*(T) - C_g\right) = \frac{1}{\tau_g}\frac{\partial}{\partial x}\left[D_g\frac{\partial(C_g\varepsilon_g)}{\partial x}\right] \tag{12}$$

شرایط مرزی نیز به صورت روابط (14,13) است.

$$x = 0 \rightarrow C_g\varepsilon_g = 0.6 \tag{13}$$

$$x = l \rightarrow D_g\frac{\partial(C_g\varepsilon_g)}{\partial x} = \frac{\varepsilon_g}{\phi}h_c\left(C_g - C_{ab}\right) \tag{14}$$

3-4- معادله جذب رطوبت توسط الیاف

پارچه به‌صورت مجموعه‌ای از قسمت‌های بافته شده در نظر گرفته می‌شود که این قسمت‌ها خود از الیافی تشکیل شده‌اند که می‌توانند رطوبت را به خود جذب کنند. این جذب رطوبت و یا جدا شدن آن‌ها از قانون فیک[1] تبعیت می‌کند. معادله مربوط به این پدیده به‌صورت رابطه (15) است.

$$\frac{\partial C_f(x,r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rD_f(x,t)\frac{\partial C_f(x,r,t)}{\partial x}\right] \tag{15}$$

در این معادله الیاف (فیبرها) به‌صورت استوانه فرض شده‌اند و به همین دلیل معادله مربوط به این قسمت در مختصات استوانه ای نوشته شده است. این معادله برای هر مقطع دایره‌ای و در طول ضخامت پارچه حل شده است.

همچنین شرایط مرزی استفاده شده برای این معادله به صورت روابط (17,16) معرفی شده است.

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial C_f}{\partial r} = 0 \tag{16}$$

$$r = R_f \rightarrow C_f(x,r,t) = \frac{\rho W_f\left(RH(x,t)\right)}{RH} \tag{17}$$

در رابطه (17)، RH رطوبت نسبی هوای اطراف الیاف و W_f میزان حجم آب جذب شده توسط الیاف است که مقدار آن از آزمایش مشخص می‌شود، به این دلیل باید رابطه آن برحسب رطوبت نسبی را از نتایج تجربی به‌دست آورد. در شکل 2 نموداری آورده شده است که این رابطه را نشان می‌دهد و در پژوهش حاضر از معادله استخراج شده از این نمودار استفاده شده است.

3-5- معادله انرژی

معادله انرژی برای عبور سیال از درون پارچه به‌صورت رابطه (18) است [7].

$$c_v\frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\omega}_g\iota_{av}\frac{\partial C_f\varepsilon_f}{\partial t} + \bar{\omega}_l\iota_{al}\frac{\partial C_f\varepsilon_f}{\partial t} - \iota_a h_{l\leftrightarrow g}\left(C^*(T) - C_g\right)\frac{\partial}{\partial x}\left[K\frac{\partial T}{\partial x}\right] \tag{18}$$

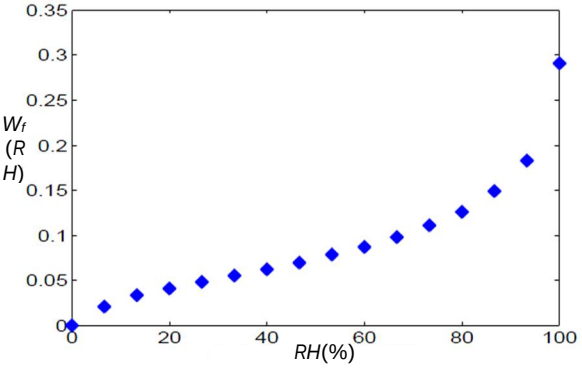

Fig. 2 Experimental measurements of the water absorbed by fibers [18]

شکل 2 نمودار اندازه‌گیری تجربی آب جذب شده توسط الیاف بر حسب رطوبت نسبی [18]

[1] Fick's law

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

که در آن عبارت $\bar{\omega}_g \iota_{av} \partial C_f \varepsilon_f / \partial t$ مربوط به انرژی آزاد شده ناشی از جذب بخار توسط الیاف پارچه، عبارت $\bar{\omega}_l \iota_{al} \partial C_f \varepsilon_f / \partial t$ مربوط به انرژی آزاد شده ناشی از جذب مایع عبوری توسط الیاف پارچه و عبارت $\iota_a h_{l\leftrightarrow g}\left(C^*(T) - C_g\right)$ مربوط به انرژی آزاد یا جذب شده ناشی از تغییر فاز سیال عبوری از درون پارچه است.

همچنین رابطه استفاده‌شده برای ضریب هدایت حرارتی به‌صورت رابطه (19) است.

$$K = 40.4 + 23W_c \tag{19}$$

شرایط اولیه و مرزی برای معادله انرژی به‌صورت روابط (20-22) درنظر گرفته شده است.

شرط اولیه

$$x = 0 \rightarrow T = 292.65\text{K} \tag{20}$$

شرایط مرزی

$$x = 0 \rightarrow T = 292.65\text{K} \tag{21}$$

$$x = L \rightarrow K\frac{\partial T}{\partial x} = -h_l(T - T_{ab}) - \frac{\varepsilon_l}{\emptyset}\iota_a h_{l\leftrightarrow g}\left(C^*(T) - C_g\right) \tag{22}$$

4- نتایج عددی

در این اثر پارچه درنظر گرفته شده برای انجام محاسبات از جنس پلی استرن فرض شده است. خواص پارچه و کمیت‌های فیزیکی استفاده شده در حل عددی در جدول شماره 1 آورده شده است.

برای صحت‌سنجی، نتایج داده‌های تجربی برای کار ژو و لی [19] با نتایج عددی به‌دست‌آمده برای دما در کار حاضر مقایسه شده است که در آن سطح زیرین پارچه در تماس کامل با سیال قرار دارد و پارچه به‌گونه‌ای قرار گرفته که در سیال فرو نرود. در این حالت دمای هوای اطراف 20 درجه سلسیوس و دمای سیال 19.5 درجه سلسیوس، همچنین رطوبت نسبی هوای اطراف 65% و ضریب انتقال جرم h_c برابر 0.137 m/s است. ضریب جابه‌جایی انتقال گرما مقدار 8.1 W/m^{2}K درنظر گرفته شده است. این ضرایب برای مرز خارجی درنظر گرفته شده‌اند. الکترولیت استفاده شده در این آزمایش کلریدپتاسیم است.

همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است برای منحنی دما نتایج محاسبات عددی با نتایج حاصل از آزمایش هم‌خوانی نزدیکی را نشان می‌دهد. دما در سطح خارجی پارچه که در تماس با هواست در ابتدا در تعادل با دمای محیط (20 درجه) است. پس از تماس سطح زیرین پارچه با سیال و آغاز نفوذ مایع به درون پارچه، دما در سطح بالایی شروع به کاهش کرده و پس از حدود 45 ثانیه به دمای 19.5 درجه که دمای سیال است، می‌رسد.

در ادامه مسئله برای شرایط مرزی بیان‌شده حل شده و دو شکل، هر یک با دو نمودار برای دو حالت با و بدون لایه الکتریکی دوگانه رسم شده است.

شکل 4 مربوط به کسر حجمی مایع در سطح خارجی پارچه و شکل 5 دما در همان سطح را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر شکل تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دو حالت وجود دارد که نشان از اهمیت درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه برای سیالات الکترولیت دارد.

همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود با درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه زمان مورد نیاز برای اشباع کامل سطح خارجی پارچه به شدت افزایش یافته که ناشی از اثر مقاومتی این پدیده است. این پدیده با القا نیروی مخالف در جهت نفوذ سیال، سرعت خیس‌شدن پارچه را به شدت کاهش می‌دهد. همان‌طور که در نمودار 4 آورده شده است برای کاملا خیس شدن پارچه در حالت بدون حضور لایه الکتریکی دوگانه مدت زمان کمتر از 7 ثانیه و پس از درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه این زمان به 38 ثانیه می‌رسد که تأثیرگذاری زیاد این پدیده را نشان می‌دهد.

در شکل 5 خط ممتد موجود در نمودار نشان‌دهنده تغییرات دما در این مرز برای عدم حضور لایه الکتریکی دوگانه است. خط چین تغییرات دما را در

جدول 1 مقدار کمیت‌های فیزیکی برای پارچه پلی استرن [5]

Table 1 The amount of physical quantities for Polyester textile [5]

کمیت	نماد	مقدار
چگالی الیاف (kg/m^3)	ρ	1380
شعاع الیاف (m)	R	10^{-5}
ضریب پخش بخار در هوا (m^2/s)	D_g	2.49×10^{-5}
میزان تخلخل پارچه	ε	0.85
پیچش موثر الیاف	τ	1.2
ضخامت پارچه (m)	L	0.002
ضریب انتقال جرم (m/s)	h_c	0.137
زاویه تماس	φ	75°
لزجت دینامیکی (kg/ms)	μ	10^{-3}
زاویه موثر الیاف در پارچه	Γ	20°

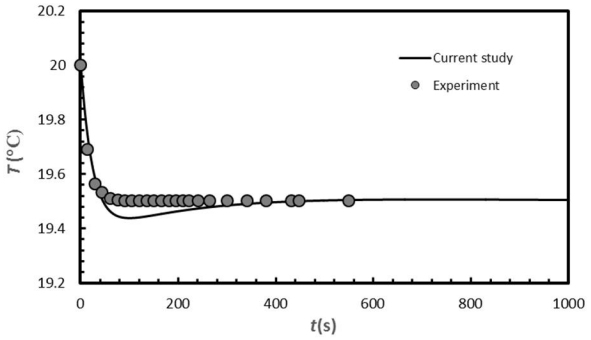

Fig. 3 Temperature changes in outer surface for current study and experimental results [17]

شکل 3 تغییرات دما در سطح خارجی پارچه برای نتایج آزمایشگاهی [17] و عددی

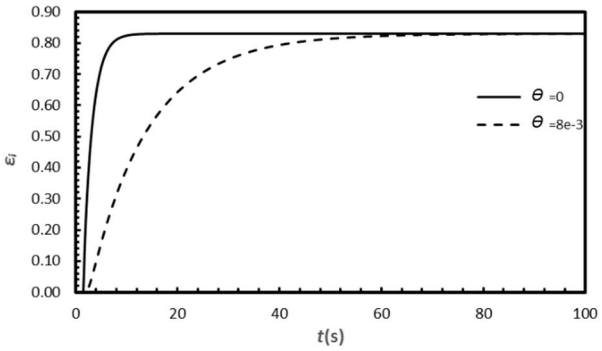

Fig. 4 Liquid volume fraction graph for both with and without considering the electric double layer

شکل 4 نمودار کسر حجمی مایع برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

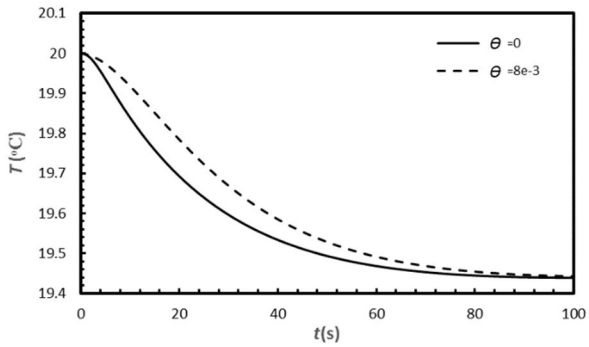

Fig. 5 The temperature on the outer surface of fabrics with and without considering the electric double layer

شکل 5 دما در سطح خارجی پارچه برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه

صورت وجود لایه الکتریکی دوگانه نشان می‌دهد. تفاوت بین این دو نمودار در مقدار بیشینه خود به حدود 20 درصد کل میزان تغییر دما می‌رسد که مقدار به نسبت بالایی است.

در ادامه به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر قدرت لایه الکتریکی دوگانه و میزان اثرگذاری آن بر توزیع دما در سطح خارجی پارچه پرداخته شده است. نخست لزجت سیال و نحوه اثرگذاری آن بر لایه الکتریکی دوگانه مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن در رابطه با تخلخل پارچه و پتانسیل زتا بحث شده است.

5-1- لزجت

لزجت به‌عنوان مقاومت سیال در برابر تغییر شکل توسط تنش برشی تعریف می‌شود و ناشی از برخورد ذرات کنار یکدیگر در سیال به دلیل تفاوت سرعت آن‌هاست.

کسر حجمی مایع در سطح خارجی پارچه برای سیال با لزجت کمتر از سیال اولیه در شکل 4 در ادامه رسم شده است. برای مقایسه میزان تأثیرگذاری لزجت بر اثر مقاومتی لایه الکتریکی دوگانه در انتقال جرم، نمودارهای برای دوحالت عدد مقاومت الکتریکی برابر صفر (نشان‌دهنده این موضوع و سیال مورد استفاده آب خالص فرض شده است) و 8×10^{-3} (نشانه الکترولیت فرض شدن سیال) رسم شده است.

با مقایسه شکل‌های 4 و 6 می‌توان مشاهده کرد که با کاهش لزجت نیروی مقاومتی ناشی از لایه الکتریکی دوگانه تقویت شده و تأثیر این پدیده بر انتقال جرم قابل ملاحظه‌تر است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شده برای لزجت 10^{-3} Pa.s در شکل 4 زمان برای دو نمودار خط و خط‌چین برای رسیدن به حالت کاملا اشباع از مایع، به ترتیب 6.5 ثانیه و 38 ثانیه است، در حالی که برای سیال با لزجت 5×10^{-4} Pa·s در شکل 6 این زمان‌ها به ترتیب 3.5 و 35 است، که همان‌طور که مشاهده می‌شود مدت زمان رسیدن پارچه به حالت اشباع برای شکل 4 با درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه کمتر از 6 برابر زمان رسیدن به اشباع بدون درنظر گرفتن این پدیده است، در حالیکه این نسبت برای لزجت کمتر، در شکل 6 تقریبا ده برابر می‌شود، که تقویت اثر لایه الکتریکی دوگانه را نشان می‌دهد.

اختلاف دمای بیشینه برای لزجت 10^{-3} Pa·s در شکل 5 برابر 0.1 درجه سلسیوس است. این اختلاف دما برای لزجت 5×10^{-4}Pa.s در شکل 7 نزدیک به 0.13 درجه سلسیوس که نشان‌دهنده افزایش تأثیر لایه الکتریکی دوگانه با کاهش لزجت است.

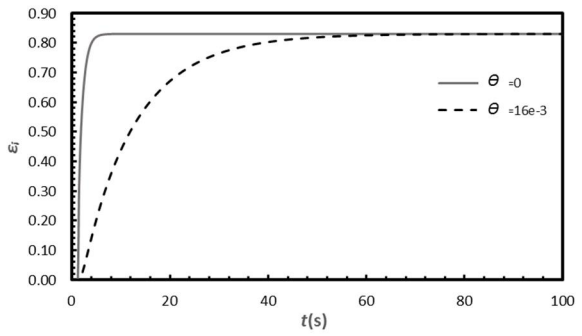

Fig. 6 liquid volume fraction in the outer surface of fabric with and without electric double layer for viscosity 5×10^{-4}

شکل 6 نمودار کسر حجمی مایع در سطح خارجی پارچه برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه در لزجت 5×10^{-4}

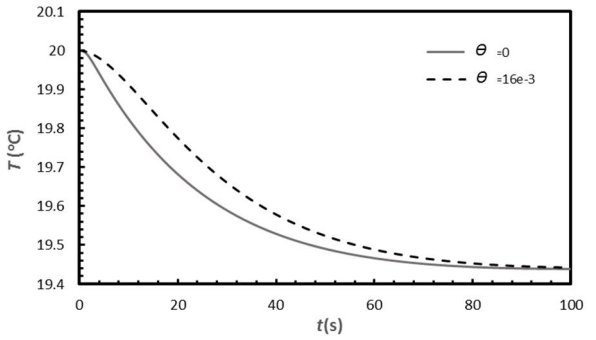

Fig. 7 Temperature graph at the outer surface of the fabric for both the presence and absence of an electric double layer viscosity 5×10^{-4}

شکل 7 نمودار دما در سطح خارجی پارچه برای دو حالت وجود و عدم وجود لایه الکتریکی دوگانه در لزجت 5×10^{-4}

دلیل این افزایش اثرگذاری لایه الکتریکی دوگانه با کاهش لزجت را می‌توان در هم‌سو بودن نحوه اثرگذاری این دو جستجو کرد. به این صورت که هر دوی این پدیده‌ها، لایه الکتریکی دوگانه و هم نیروی لزجتی، اثرات مقاومتی در برابر حرکت سیال دارند و با کاهش لزجت فرصت اثرگذاری به لایه الکتریکی دوگانه داده می‌شود تا نیروی مقاومتی اصلی باشد و اثرگذاری آن بهتر دیده می‌شود.

5-2- تخلخل

تخلخل پارچه به‌عنوان یک پارامتر ساختاری پارچه مطرح می‌شود که بیانگر نوع بافت از نظر ریزبافت (تخلخل پایین) یا درشت بافت بودن (تخلخل بالا) خواهد بود.

با مقایسه شکل‌های 4 با 8 می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تخلخل (در شکل‌های 4 و 5 تخلخل پارچه 0.85 درنظر گرفته شده است) میزان تأثیرگذاری لایه الکتریکی دوگانه افزایش می‌یابد. برای تخلخل 0.95 نسبت به 0.85 زمان نفوذ در حالت بدون وجود لایه الکتریکی دوگانه اندکی افزایش پیدا کرده و پس از اعمال این پدیده در معادلات، زمان خیس شدن کامل پارچه از 38 ثانیه به 45 ثانیه رسیده است که نشان‌دهنده افزایش 18.5 درصدی قدرت مقاومتی لایه الکتریکی دوگانه است.

در شکل 9 تغییرات دما در سطح خارجی پارچه برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه رسم شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این بخش در هماهنگی با نتایج به‌دست‌آمده در قسمت پیشین برای کسر حجمی مایع است. با دقت در شکل‌های 5 و 9 می‌توان مشاهده کرد که فاصله میان

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

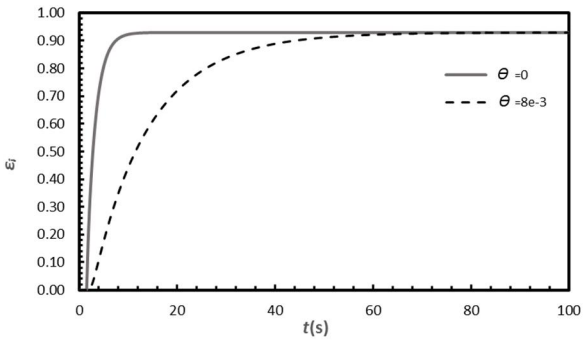

Fig. 8 Liquid volume fraction graph for both with and without considering the dual electric layer for porosity 0.95

شکل 8 نمودار کسر حجمی مایع برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه برای پارچه با تخلخل 0.95

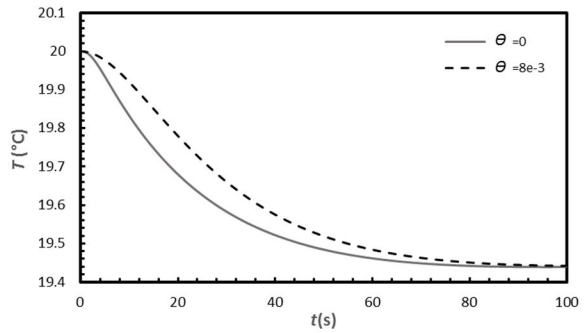

Fig. 9 The outer surface temperature for both with and without considering the electric double layer for porosity 0.95

شکل 9 دما در سطح خارجی برای دو حالت با و بدون درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه پارچه در تخلخل 0.95

خط ممتد و خط چین‌ها در نمودارها با افزایش تخلخل افزایش می‌یابد که به معنی افزایش قدرت لایه الکتریکی دوگانه با افزایش تخلخل و تأثیر بیشتر در دمای سطح خارجی پارچه است. از مقایسه شکل 5 با شکل 9 مشخص می‌شود که با افزایش تخلخل پارچه از 0.85 به 0.95 میزان تأثیرگزاری پدیده لایه الکتریکی دوگانه در دمای سطح خارجی پارچه حدود 15 درصد افزایش یافته است.

افزایش میزان تخلخل$\emptyset$ سبب کوچک‌تر شدن شعاع روزنه‌های عبور سیال، پس از خیس شدن می‌شود [7] و با کوچک شدن روزنه‌ها سرعت نفوذ سیال درون پارچه کاهش می‌یابد. از طرفی کوچک‌شدن روزنه‌ها سبب تقویت پتانسیل الکتریکی ناشی از بارهای روی دیواره‌های روزنه‌ها در مسیر عبور سیال و اثرگذاری بیشتر لایه الکتریکی دوگانه می‌شود.

5-3- پتانسیل زتا

پتانسیل زتا به‌عنوان یک پتانسیل الکتریکی در اطراف ذرات، سلول‌ها و سطوح مختلف وجود دارد. برای نمونه وقتی ذره بارداری در یک محلول قرار می‌گیرد به دلیل پخش بار در سطح آن، سبب تأثیر در یون‌های مجاور شده که نتیجه آن افزایش غلظت تعداد یون‌ها (با بار مخالف الکتریکی) در فاصله نزدیک ذره می‌شود؛ بنابراین ذره در محلول توسط یک لایه از یون‌های با بار مخالف محصورشده که این لایه به وجود آمده لایه استرن[1] نامیده می‌شود. همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود این لایه شامل یون‌هایی با بار مخالف بار ذره است که به‌صورت قوی با سطح ذره اتصال پیدا کرده است. در قسمت بیرونی لایه استرن، تعداد زیادی از یون‌های با بارهای مخالف وجود دارد که سبب تشکیل یک لایه ابری شکل می‌شود، که به دلیل نیروی اتصال ضعیف‌تر، به آن لایه لغزنده[2] نیز گفته می‌شود. مرز لایه لغزنده در جایی قرار می‌گیرد که پس از آن دیگر به یون‌های موجود در محلول (تقریبا) نیرویی وارد نمی‌شود و پتانسیل این ناحیه پتانسیل زتا نامیده می‌شود. این مسئله برای سطوح نیز به همین شکل قابل بیان است [16].

در ادامه با رسم نمودار غلظت مایع در سطح خارجی پارچه برای دو حالت وجود لایه الکتریکی دوگانه و عدم وجود آن برای پتانسیل الکتریکی زتا 3 میلی‌ولت در شکل 11 و مقایسه آن با شکل 4 (رسم‌شده برای پتانسیل زتای 30 میلی‌ولت) به بررسی تأثیر این عامل بر کسر حجمی مایع پرداخته شده است.

با توجه به شکل 4 در اختلاف کسر حجمی بین دو حالت درنظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه و صرف نظر از آن، تفاوت غیرقابل صرف نظری وجود دارد و در برخی از زمان‌ها تفاوت 100 درصدی را نشان می‌دهد. در نمودارهای رسم‌شده در شکل 11 برای پتانسیل زتای 3 میلی‌ولت اختلاف بین دو نمودار خط و خط‌چین در حالت بیشنه خود کمتر از 13درصد و در بیشتر زمان‌ها این اختلاف قابل صرف نظر است. از این‌رو پتانسیل زتا عامل بسیار تأثیرگذار در میزان شدت یا ضعف اثر لایه الکتریکی دوگانه بر انتقال جرم است.

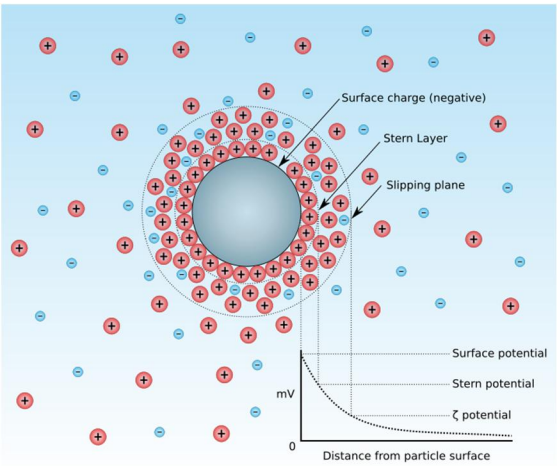

Fig. 10 Placement ions around a charged particle and the calculation of the zeta potential [16]

شکل 10 نحوه قرارگیری یون‌ها در اطراف ذره باردار و محل محاسبه پتانسیل زتا [16]

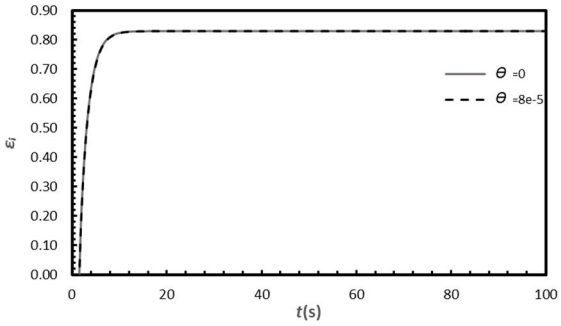

Fig. 11 liquid volume fraction in the outer surface of the fabric for both the presence and absence of dual electric layer for zeta potential of 3 mV

شکل 11 نمودار کسر حجمی مایع در سطح خارجی پارچه برای دو حالت وجود و عدم وجود لایه الکتریکی دوگانه در پتانسیل زتای 3 میلی‌ولت

[1] Stern layer

[2] Slipping layer

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

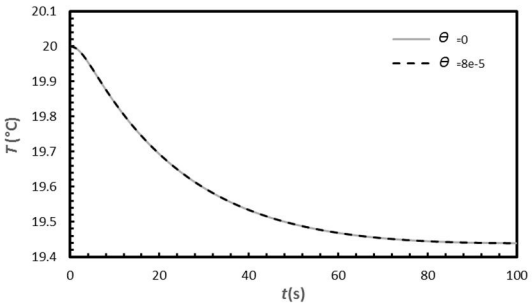

Fig. 12 Temperature changes in the outer surface of fabric for both the presence and absence of, electric double layer for zeta potential of 3 mV

شکل 12 نمودار تغییرات دما در سطح خارجی پارچه دو حالت وجود و عدم وجود لایه الکتریکی دوگانه برای پتانسیل زتای 3 میلی‌ولت

در ادمه به بررسی تأثیر پتانسیل زتا بر قدرت تأثیرگذاری لایه الکتریکی دوگانه بر دمای سطح خارجی پارچه پس از آغاز تماس پارچه با سیال پرداخته شده است.

در شکل 5 که برای پتانسیل زتا 30 میلی‌ولت رسم شده است مشاهده شد که اختلاف دما برای نمودارهای حالت با لایه الکتریکی دوگانه و حالت مربوط به حضور نداشتن آن در بیشینه خود به 20درصد کل تغییر دمایی رسید که در طول فرایند انتقال جرم رخ می‌دهد. در شکل 12 بیشینه اختلاف دمای بین نمودارهای خط ممتد و خط چین بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر و نشان‌دهنده اهمیت پتانسیل زتا در تأثیر لایه الکتریکی دوگانه بر انتقال حرارت درون پارچه است.

دلیل این اثرگذاری پتانسیل زتا می‌توان در این موضوع جستجو کرد که در واقع این پتانسیل یکی از عوامل موثر در قدرت میدان الکتریکی بوجود آمده است که شدت و ضعف آن بر شدت و ضعف میدان الکتریکی اثرگذار است.

همچنین زمان اشباع شدن کامل پارچه برای سیال غیرالکترولیت نزدیک به 4 ثانیه است که این زمان در صورت استفاده از محلول الکترولیت به بیشتر از 27 ثانیه می‌رسد، که اختلاف زمان 23 ثانیه‌ای را نشان می‌دهد.

6- نتیجه‌گیری

در این اثر به بررسی تاثیر پدیده لایه الکتریکی دوگانه بر انتقال گرما و جرم در پارچه پرداخته شد. در این پژوهش پارچه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که یک سمت آن در حالت کاملا اشباع از مایع و سمت دیگر آن در تماس با هوا قرار دارد. در ابتدا اثرگذاری این پدیده برای سیالات الکترولیت، با وارد کردن آن در معادلات نشان داده شد و مشخص شد در انتقال حرارت و جرم درون پارچه چنان‌چه سیال ما الکترولیت باشد، پدیده‌ی لایه الکتریکی دوگانه می‌تواند بسیار موثر باشد.

از طرفی عوامل عمده تأثیرگذار بر قدرت لایه الکتریکی دوگانه که شامل لزجت، تخلخل و پتانسیل زتا می‌شدند مورد بررسی قرار گرفتند و مشخص شد با کاهش لزجت، افزایش تخلخل، و افزایش پتانسیل زتا می‌توان اثرگذاری لایه الکتریکی دوگانه را به شدت تقویت کرد.

7- فهرست علایم

c_v ظرفیت گرمایی حجمی پارچه ($kJm^{-3}K^{-1}$)

c_{vf} ظرفیت گرمایی حجمی الیاف ($kJm^{-3}K^{-1}$)

c_{vg} ظرفیت گرمایی حجمی بخار ($kJm^{-3}K^{-1}$)

C_{ab} غلظت بخار آب موجود در هوای اطراف (kgm^{-3})

C_f غلظت بخار آب موجود در الیاف (kgm^{-3})

C_g غلظت بخار آب موجود در هوای درون فضای خالی روزنه‌ها (kgm^{-3})

C^* غلظت بخار آب اشباع (kgm^{-3})

e بار اکتریکی پایه (C) 1.602×10^{-19}

h_c ضریب انتقال جرم جابه‌جایی (m/s)

$h_{l\leftrightarrow g}$ ضریب انتقال جرم بین فاز مایع و گاز (m/s)

h_t ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (m/s)

T دمای پارچه (K)

T^* دمای اشباع (K)

W_c میزان آب موجود در پارچه

علائم یونانی

γ زاویه‌ی الیاف نسبت به سطح پارچه

ε_f کسر حجمی پارچه

ε_g کسر حجمی بخار

ε_l کسر حجمی مایع

ζ پتانسیل زتا (V)

Θ عدد مقاومت الکتریکی

ι_a گرمای نهان تبخیر (kJ/kg)

ι_{al} گرمای جذب مایع توسط الیاف (kJ/kg)

ι_{av} گرمای جذب بخار توسط الیاف (kJ/kg)

ρ چگالی الیاف پارچه (kg/m^3)

ρ_e چگالی بار الکتریکی بر واحد حجم (C/m^3)

ρ_l چگالی مایع (kg/m^3)

σ کشش سطحی (N/m)

τ پیچش مؤثر پارچه

ϕ میزان تخلخل پارچه

χ ظرفیت یون‌های الکترولیت

ψ پتانسیل الکتریکی (V)

ϖ_g نسبت بخار جذب‌شده توسط الیاف

ϖ_l نسبت مایع جدب‌شده توسط الیاف

8- مراجع

[1] P. Henry, Diffusion in absorbing media, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 171, No. 945, pp. 215-241, 1939.

[2] H. David, P. Nordon, Case studies of coupled heat and moisture diffusion in wool beds, Textile Research Journal, Vol. 39, No. 2, pp. 166-172, 1969.

[3] Y. Ogniewicz, C. Tien, Analysis of condensation in porous insulation, Heat and Mass Transfer, Vol. 24, No. 3, pp. 421-429, 1981.

[4] A. P. Shapiro, S. Motakef, Unsteady heat and mass transfer with phase change in porous slabs: Analytical solutions and experimental results, Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 1, pp. 163-173, 1990.

[5] 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, Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No. 10, pp. 2343-2352, 2004.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]

[6] H. Huang, C. Ye, W. Sun, Moisture transport in fibrous clothing assemblies, Engineering Mathematics, Vol. 61, No. 1, pp. 35-54, 2008.

[7] Y. Li, Q. Zhu, Simultaneous heat and moisture transfer with moisture sorption, condensation, and capillary liquid diffusion in porous textiles, Textile Research Journal, Vol. 73, No. 6, pp. 515-524, 2003.

[8] L. Ren, W. Qu, D. Li, Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels, Heat and Mass Transfer, Vol. 44, No. 16, pp. 3125-3134, 2001.

[9] C. Soong, S. Wang, Theoretical analysis of electrokinetic flow and heat transfer in a microchannel under asymmetric boundary conditions, Colloid and Interface Science, Vol. 265, No. 1, pp. 202-213, 2003.

[10] P. Dutta, A. Beskok, T. C. Warburton, Numerical simulation of mixed electroosmotic/pressure driven microflows, Numerical Heat Transfer: Part A: Applications, Vol. 41, No. 2, pp. 131-148, 2002.

[11] Z. Yang, X. Peng, B. Wang, Fully developed electroosmotically and hydrodynamically induced convection between two parallel plates, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 50, No. 10, pp. 905-926, 2006.

[12] T. -S. Zhao, Q. Liao, Thermal effects on electro-osmotic pumping of liquids in microchannels, Micromechanics and Microengineering, Vol. 12, No. 6, pp. 962, 2002.

[13] A. Jain, M. K. Jensen, Analytical modeling of electrokinetic effects on flow and heat transfer in microchannels, Heat and Mass Transfer, Vol. 50, No. 25, pp. 5161-5167, 2007.

[14] P. Hwang, C. Soong, Investigation of variable-property microchannel flows with electro-thermo-hydrodynamic interactions at constant pressure gradient or constant flow rate, Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 1, pp. 210-223, 2008.

[15] Q. -Y. Zhu, J. Yang, M. -H. Xie, Effects of zeta potential and fiber diameter on coupled heat and liquid moisture transfer in porous polymer materials, Fiber Bioengineering and Informatics, Vol. 3, No. 1, pp. 16-21, 2010.

[16] A. J. Bard, L. R. Faulkner, Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, pp. 8-18, New York: John Wiley & Sons, 1980.

[17] Q. Zhu, Y. Li, Numerical simulation of the transient heat and liquid moisture transfer through porous textiles with consideration of electric double layer, Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 7, pp. 1417-1425, 2010.

[18] J. Fan, Z. Luo, Y. Li, Heat and moisture transfer with sorption and condensation in porous clothing assemblies and numerical simulation, Heat and Mass Transfer, Vol. 43, No. 16, pp. 2989-3000, 2000.

[19] Q. -Y. Zhu, J. Yang, M. -H. Xie, Effects of zeta potential and fiber diameter on coupled heat and liquid moisture transfer in porous polymer materials, Fiber Bioengineering and Informatics, Vol. 3, No. 1, pp. 16-21, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.6.23.6]