

ماهنامه علمى پژوهشى

ے مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی تأثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و افزایش نرخ تبخیر آب

قاسم حيدرى نژاد1*، رضا بابايى2

1 - استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 2 - دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 * تهران، صندوق پستی 143-1411 gheidari@modares.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، مشخصههای میدان جریان و انتقال جرم در یک کانال مسطح شامل یک حفره آب بدون حضور و همچنین تحت تأثیر میدان الکتریکی به کمک روش شبیهسازی گردابههای بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی نشاندهنده تطابق خوب مدل در پش بینی جریان و انتقال جرم است. در ادامه اثر مقدار عدد رینولدز و ولتاژ میدان الکتریکی بر میزان نرخ تبخیر تحلیل شده	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 مهر 1394 پذیرش: 04 آذر 1394 بابات
است. نتایج عددی نشان میدهد که اعمال ولتاژ قوی به الکترود سیمی سبب ایجاد اغتشاش و تولید گردابه روی سطح آب میشود. مشاهده م شود که در یک عدد بنواد: ثابته با افنانش ولتاژ اعمال درخ تبخیر افنانش و باید، اما در یک ولتاژ ثابت با افنانش عدد بنواد: ورودی، زخ	ارائه در سایت: 28 ادر 1394 <i>کلید واژگان:</i> الکت مهید ودیناویک
تبخیر تا عدد رینولدز 1391 نرخ صعودی و پس از آن به دلیل کاهش اندازه گردابه حاصل از میدان الکتریکی نرخ نزولی دارد. همچنین با استفاده از نتایج بدست آمده در محدوده اعداد رینولدز بشت از 3391، یک رابطه خطی بین عدد شوود نسب و عدد الکتروهیدرودینامیک	، د صروحيدروديه مينڪ باد کرونا تبخير آب
استخراج شد. در انتها نیز یک رابطه بین اعداد بدون بعد حاکم بر جریان الکتروهیدرودینامیکی مانند عدد شروود نسبی، عدد رینولدز و عدد الکتروهیدرودینامیک بدست آمد.	تحلیل عددی

Numerical investigation of the electric field effect on the flow field and enhancement of the water evaporation rate

Ghassem Heidarinejad^{*}, Reza Babaei

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 02 October 2015 Accepted 25 November 2015 Available Online 19 December 2015

Keywords: Electrohydrodynamic (EHD) Corona wind Water evaporation Numerical investigation

ABSTRACT

In this paper, the flow field and mass transfer characteristics were evaluated numerically via Large Eddy Simulation in the presence and absence of the electric field in flat channel that is includes cavity containing water. Comparison of the numerical results with the experimental data was in good agreement with experimental data for prediction of flow field and mass transfer. Then, the effect of the Reynolds number variations in the different applied voltage on the water evaporation rate is investigated. The results indicate that applying the high voltage at the wire electrode can generate vortex and produce perturbation on the water surface. It is shown that at constant Reynolds number with the presence of the electric field, the Sherwood number will be increased but in constant applied voltage the Sherwood number will increase to the Reynolds of 3391 and then will decrease due to reduction in the size of generated vortex. Also, a linear relationship was obtained and relationship exists between the Sherwood number factor and the EHD number at Reynolds numbers greater than 3391. Finally, a relationship between dimensionless numbers like the relative Sherwood number, the Reynolds number and the EHD number was obtained.

کمی دارند. همچنین در بسیاری از موارد، افزایش دما سبب کاهش کیفیت محصولات کشاورزی میشوند [2،1]. یکی از روشهای نوین در این زمینه استفاده از میدان الکتریکی قوی است که بدون نیاز به افزایش دما، سبب افزایش نرخ تبخیر میشود. اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود سیمی و صفحهای سبب ایجاد میدان الکتریکی قوی در اطراف الکترود سیمی میشود. شدت میدان الکتریکی موجب یونیزاسیون هوا و تشکیل پلاسما در اطراف الکترود سیمی میشود. مکانیزم تخلیه کرونا در آزمایشگاه مانند مکانیزم تولید رعد و برق آسمان است. تفاوت این دو در این است که پدیده

1- مقدمه

افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم (نرخ تبخیر^۱) از مهمترین موضوعات مهندسی هستند که موجب کوچک شدن مبدلهای حرارتی و همچنین کاهش مصرف انرژی میشوند. از کاربردهای افزایش تبخیر میتوان به صنایع غذایی (خشک کردن تکههای میوه)، صنایع کاغذسازی و نساجی اشاره نمود. استفاده از جریان حجمی هوا با درجه حرارت زیاد و سرعت بالا از روشهای رایج در افزایش نرخ تبخیر میباشند که به دلیل مصرف بالای انرژی بازده

1- Evaporation rate

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Gh. Heidarinejad, R. Babaei, Numerical investigation of the electric field effect on the flow field and enhancement of the water evaporation rate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 101-110, 2016 (in Persian)

قاسم حیدری نژاد و رضا بابایی

رعد و برق تابعي از انباشتگي ولتاژ داخل ابرها است و تا اختلاف ولتاژ مناسب ایجاد نگردد، رعد و برق ایجاد نمی گردد. در تخلیه کرونا همیشه یک اختلاف ولتاژ مناسب حضور دارد و سبب می شود که خازن 1500 جرقه در ثانیه را ايجاد نمايد. ميدان الكتريكي قوى اطراف الكترود سيمي سبب يونيزاسيون هوا شده و اجزای موجود در هوا را تبدیل به اتمهای واکنشی مانند یون مثبت اکسیژن مینماید. حرکت یونهای تولید شده از الکترود سیمی به سمت الکترود صفحهای و برخورد آنها با مولکولهای هوا سبب انتقال مومنتوم از یونها به مولکولهای خنثی هوا شده و در نتیجه باد یونی¹(باد کرونا²) تولید می شود. باد کرونا سبب ایجاد اغتشاش در لایه هوای مجاور سطح آب گردیده و منجر به افزایش آهنگ تبخیر می گردد. از آنجا که اعمال میدان الکتریکی موجب تحرک و پویایی سیال می گردد، این روش را روش الكتروهيدروديناميك (EHD)³ مي نامند [3].

به دلیل ارتباط پیچیده بین معادلات میدان جریان و میدان الکتریکی، اکثر مطالعات به صورت آزمایشگاهی بودهاند. اگر چه اخیرا مطالعات عددی محدودی در زمینه اثر میدان الکتریکی بر افزایش نرخ انتقال حرارت (اجباری و طبيعي) انجام شده است، اما مطالعات عددي در زمينه اثر ميدان الكتريكي بر روی افزایش نرخ تبخیر بسیار اندک میباشند. لاکه و ملکی [4] اثر میدان الکتریکی را روی جابجایی آزاد به صورت عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که افزایش ولتاژ اعمالی از 7.5kV تا 10.5kV سبب افزایش نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد از 4.2 تا 8.7 برابر خواهد شد. متیو و لای [5] اثر میدان الکتریکی را بر جابجایی اجباری به صورت عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که در یک میدان الکتریکی ثابت، میدانهای جریان و دما در اعداد رینولدز پایین رفتار نوسانی دارند و با افزایش عدد رینولدز، این رفتار نوسانی از بین رفته و جریان پایدار میشود. عالم قلیلو و اسماعیل [6] خنک کاری دندانههای مکعبی در یک کانال را به صورت آزمایشگاهی بررسی و نشان دادند که اثر میدان الکتریکی در اعداد رینولدز پایین بیشتر است. ديلمي و همكاران [7] با بررسي اثر چيدمان الكترودها در كانال، تركيب بندی خاصی را یافتند که در آن میزان انتقال حرارت تا 4 برابر افزایش مىيابد. احمد و هاوت [8] اثر ميدان الكتريكي را بر روى الكوى جريان با استفاده از مدل آشفتگی k-ɛ بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که باد کرونا در ناحیه بین الکترود سیمی و الکترود صفحهای سبب ایجاد آشفتگی محلی و افزایش نرخ تبخیر میشود. کامکاری و عالمرجبی [9] اثر سه پارامتر عدد رینولدز، ولتاژ و فاصله بین الکترودها را بر روی نرخ تبخیر آب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها نشان دادند که اثر عدد رینولدز و ولتارُ بسيار بيشتر از اثر فاصله بين الكترودها مىباشد. آنها همچنين افزايش نرخ تبخير را در ولتاژ 7 تا 40 kV برابر مقدار نرخ تبخير بدون الکتروهیدرودینامیک گزارش کردند. رفیع و همکاران [10] مشخصههای میدان جریان و انتقال حرارت را در یک کانال مسطح تحت شار حرارتی ثابت به صورت عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که سرعت جریان ورودی بر روی ابعاد گردابه تولید شده تأثیر گذار میباشد. آنها همچنین نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با ولتاژ اعمالی رابطه مستقیم داشته و در ولتاژ 20 کیلو ولت به طور میانگین 15 درصد بیشتر از ولتاژ 16 کیلو ولت است. علمداری و همكاران [11] اثر قطر الكترود سيمي را بر روى انتقال حرارت جابهجايي طبیعی به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در کمترین

قطر سیم، عدد ناسلت دو برابر حالت بدون اعمال میدان الکتریکی افزایش می یابد. لای و همکاران [12] اثر پارامترهای مختلف را بر روی نرخ تبخیر به صورت آزمایشگاهی بررسی و یک رابطه خطی بین پارامترهای بی بعد شده در حضور میدان الکتریکی ارائه کردند. هوانگ و لای [13] به صورت عددی و با استفاده از معادلات انتقال ورتیسیتی، افزایش نرخ تبخیر آب را در حضور میدان الکتریکی بررسی کردند. آنها نشان دادند که الگوی میدان غلظت بخار آب مطابق با الگوی میدان جریان ثانویه است. حیدرینژاد و بابایی [14] میدان آشفتگی تولید شده را با استفاده از روش شبیهسازی ادیهای بزرگ مدل کردند. آنها نشان دادند با افزایش ولتاژ اعمالی میزان آشفتگی اطراف الکترود و سطح آب افزایش مییابد.

موضوع کار حاضر در اکثر تحقیقات قبلی به صورت آزمایشگاهی بوده و تنها کار عددی در این زمینه توسط هوانگ و لای [13] انجام شده است. ایرادات اساسی کار آنها در زیر آمده است

- با اینکه اعداد رینولدز در محدوده جریان اغتشاشی بوده و همچنین ميدان الكتريكي نيز توليد اغتشاش محلى ميكند، اما معادلات استفاده شده در کار آنها به صورت جریان آرام میباشد.

- در کار آنها غلظت بخار آب بر روی کل سطح عدد یک در نظر گرفته شده است. اما همانگونه که میدانیم غلظت بخار آب بر روی سطح آب به دلیل تغییرات دمایی متغیر بوده و ثابت نمیباشد.

- در کار آنها معادله انرژی در نظر گرفته نشده است.

نوآوری کار حاضر نسبت به کارهای پیشین توجه به فیزیک کامل جریان و در نظر گرفتن آن در معادلات حاکم و حل عددی میباشد. در تحقیق حاضر معادلات حاکم با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی حل شده و نتایج عددی حاصل با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی میشود. در ادامه تأثیر عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی بر الگوی میدان جریان و میزان افزایش نرخ تبخیر آب در کانال بررسی خواهد شد. در این کار از روش شبیه سازی گردابههای بزرگ برای مدلسازی اغتشاش جریان استفاده شده است. همچنین از الگوریتم سیمپل برای حل میدان جریان و از الگوریتم کاپستوف برای حل میدان الکتریکی استفاده شده است.

2- هندسه مورد بررسی

1 طرحواره مسأله مورد بررسی و محل قرارگیری الکترود سیمی در شکل نمایش داده شده است. کانال مورد نظر شامل یک حفره دارای آب است. هوا با سرعت مشخص از سمت چپ کانال وارد شده و با گذر از سطح آب و جذب بخار آب از سمت راست کانال خارج می شود. ابعاد به کار رفته مطابق مدل آزمایشگاهی لای و همکاران [12] در نظر گرفته شده است.

3- معادلات حاكم

[Downloaded from mme

- 1- Ionic wind
- 2- Corona wind
- 3- Electro hydrodynamic

در این مطالعه از روشهای دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی اثر يديده كرونا بر تبخير استفاده شده است. معادلات حاكم شامل معادلات میدان الکتریکی و معادلات جریان سیال میباشند.

1-3- معادلات ميدان الكتريكي نيروي الكتريكي بر واحد حجم توسط رابطه (1) بيان ميشود كه شامل سه جمله می باشد. (de) 1

$$F_{ei} = \rho_c E_i - \frac{1}{2} E_i^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E_i^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \right]$$
(1)



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p u_i T)
= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K + \frac{\mu_t c_p}{\mathbf{Pr}_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + F_{ev}$$
(10)

litral (jeta) (10)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\xi_{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho u_{i}\xi_{\nu}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left[\left(\rho D_{\nu} + \frac{\mu_{t}}{\mathbf{Sc}_{t}}\right)\frac{\partial\xi_{\nu}}{\partial x_{j}}\right]$$
(11)

در روابط (8) تا (11) μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی سیال (هوا و اب)، c_p ضریب حرارتی ویژه، K ضریب هدایتی سیال، \mathbf{Pr}_t عدد پرانتل اغتشاشی، μ_t عدد اشمیت اغتشاشی، ξ_v کسر جرمی غلظت بخار آب در هوا و \mathbf{Sc}_t لزجت اغتشاشی است.

در رابطه (9) F_{ei} بیانگر نیروی الکتریکی (نیروی کولمب) است. در معادله (10) F_{ev} بیانگر اثر نفوذ گونه (بخار آب) در معادله انرژی میباشد.

$$F_{\rm ev} = \frac{\partial}{\partial x_{\rm j}} \left[\rho D_{\nu} (c p_{\rm g} T) \frac{\partial \xi_{\nu}}{\partial x_{\rm j}} \right]$$
(12)

در معادله (11) ξ_v کسر جرمی بخار اب است و از مقدار ان از رابطه محاسبه میشود.

$$\xi_v = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{W}{\mathbf{1} + W} \tag{13}$$

$$W = \frac{m_{\nu}}{m_{a}} = 0.622 \frac{\varphi P_{S}}{P - \varphi P_{S}}$$
(14)

$$\varphi = (1 + \frac{0.022}{W_S}) / (1 + \frac{0.022}{W})$$
(15)

$$\ln\left(\frac{P_S}{22087.87}\right) = \frac{0.01}{T + 273} (374 - T) \sum_{i=1}^{8} F_i (0.65 - 0.01T)^{i-1}$$

$$F_1 = -741.9242, F_2 = -29.721, F_3 = -11.5, F_4 = -0.86851$$

 $F_5 = 0.1094098, F_6 = 0.439993, F_7 = 0.2520, F_8 = 0.05218$ (16)

نفوذ جرمی بخار آب در هوا
$$(D_v)$$
 تابعی از دما است و توسط رابطه (17)
تعیین می گردد [18].

$$D_{\nu} = 2 \times 10^{-5} \left(\frac{T + 273}{273}\right)^{1.8}$$
(17)

در کار احمد و هاوت [8] که مربوط به انتقال حرارت هیدرودینامیکی است، جهت مدلسازی آشفتگی از مدل آشفتگی k- ϵ استفاده شده است. نتایج تحقیق آنها نشان داده است که مدل آشفتگی k- ϵ برای مقادیر عدد ناسلت بیشپیشبینی داشته است. به همین دلیل در این مقاله از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES)⁷ استفاده شده است که یک روش جدید





جمله اول از سمت چپ نیروی کولمب¹ است که سبب تولید باد کرونا می شود. جمله دوم و سوم به ترتیب بیانگر دی الکتروفورتیک² و الکتروستریکشن³ هستند. جمله سوم در سیال تراکمپذیر مهم است و در نتیجه در این تحقیق قابل صرفنظر است [15]. در ادامه معادلات حاکم بر میدان الکتریکی بیان می شوند [15].

معادله ماکسول⁴ (معادله پواسون⁵):

$$\nabla \cdot E_{\rm i} = \frac{\rho_c}{\varepsilon} \tag{2}$$

معادله پيوستگى چگالى جريان:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot J_i = \mathbf{0} \tag{3}$$

قانون اهم°:

$$J_{i} = \rho_{c} b E_{i} + \rho_{c} u_{i}$$

$$(4)$$

$$(4)$$

$$(5) \quad \text{i.e.} \quad (5)$$

$$E_{i} = -\nabla V \tag{5}$$

$$\nabla^2 V = -\frac{r_c}{\varepsilon} \tag{6}$$

$$\nabla \rho_c \cdot \left(bE_i + u_i \right) + b \frac{\rho_c^2}{\varepsilon} = \mathbf{0}$$
⁽⁷⁾

روابط (5) تا (7) به عنوان معادلات حاکم برای میدان الکتریکی در نظر گرفته شده و گسسته سازی میشوند.

3-2- معادلات جريان سيال

معادلات حاکم بر جریان سیال مغشوش شامل پیوستگی، انتقال مومنتوم، بقای انرژی و انتقال گونه (غلظت بخار آب) میباشند. معادلات حاکم از متوسط گیری مکانی معادلات ناویر -استوکس منتج شده است. در این تحقیق تغییرات دمایی بین 15 تا 26 درجه سانتی گراد میباشد. تغییرات خواص ترمودینامیکی هوا و آب در اختلاف دمای 11 درجه سانتی گراد اندک میباشد. بنابراین خواص ترمودینامیکی مانند چگالی و غیره (بجز نفوذ جرمی بخار آب در هوا) ثابت در نظر گرفته میشوند. معادلات جریان سیال شامل پیوستگی، بقای مومنتوم، انرژی و گونه در ادامه آمده است [16].

'
>
١
)
)
)

7- Large Eddy Simulation8- Subgrid model9- Smagorinsky-Lilly

103

 $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\rho u_{i}) = 0$ (8) بقای مومنتوم: $\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_{i}) + \frac{\partial}{\partial x_{i}} (\rho u_{i} u_{j})$

- 1- Coulomb force
- 2- Dielectrophoretic force
- 3- Electrostriction force
- 4- Maxwell equation
- 5- Poisson equation
- 6- Ohm's law

$$L_s = \min(kd_{s'}C_s\Delta) \tag{21}$$

$$\Delta = (\Delta x \times \Delta y \times \Delta z)^{\frac{1}{3}}$$
⁽²²⁾

ثابت فون-كارمن و \mathcal{C}_s ثابت اسماگورينسكى است كه 0.1 مىباشد. k

4- شرایط مرزی

شرایط مرزی در شکل 2 نشان داده شده است. هوا با سرعت، دما و میزان رطوبت مشخص وارد دامنه محاسباتی می شود. برای مرز خروجی دامنه محاسباتی، شرط توسعه یافتگی برای همه متغیرهای مسئله در نظر گرفته شده است. دیوارها به صورت آدیاباتیک و با شرط عدم لغزش می باشند. ولتاژ شده است. دیوارها به صورت آدیاباتیک و با شرط عدم لغزش می باشند. ولتاژ (V) بر روی الکترود سیمی دارای مقدار ولتاژ اعمال شده ثابت توسط باتری (V_0) و در الکترود صفحه ای (زمینی) دارای مقدار صفر و در بقیه مکانها دارای شرط نیومن (گرادیان صفر) می باشد.

شرایط مرزی برای مرز مشترک آب و هوا در روابط (23) آمده است.

$$u_{\rm a} = u_{\rm w} \tag{23-a}$$

$$T_{\rm a} = T_{\rm w} \tag{23-b}$$

$$\xi_{v} = \xi_{v,s} \tag{23-c}$$

$$\mu_{a} \frac{\partial u}{\partial y} |_{a} = \mu_{w} \frac{\partial u}{\partial y} |_{w}$$
(23-d)

$$K_{a}\frac{\partial T}{\partial y}|_{a} = K_{w}\frac{\partial T}{\partial y}|_{w} + \rho_{a}D_{v}h_{fg}\frac{\partial \xi_{v}}{\partial y}$$
(23-e)

روابط (a-23) و (23-e) به ترتیب بیانگر پیوستگی تنش برشی و موازنه

انرژی روی سطح مشترک میباشند.

$$V_{a} = V_{w}$$
 (23-f)

$$\varepsilon_{a} \frac{\partial V}{\partial y} |_{a} - \varepsilon_{w} \frac{\partial V}{\partial y} |_{w} = \rho_{s}$$
(23-g)

$$\rho_{c,a}b_{a}\frac{\partial V}{\partial y}|_{a} = \rho_{c,w}b_{w}\frac{\partial V}{\partial y}|_{w}$$
(23-h)

روابط (f) تا (23-h) به ترتیب بیانگر پیوستگی پتانسیل الکتریکی، قانون گوس روی مرز مشترک و پیوستگی چگالی جریان الکتریکی میباشند. چگالی بار الکتریکی (ρ_c) بر روی الکترود سیمی دارای یک مقدار ثابت و

پی از مکان ها دارای گرادیان صفر میباشد. چگالی بار الکتریکی بر روی در بقیه مکان ها دارای گرادیان صفر میباشد. چگالی بار الکتریکی بر روی سیم (ρ_{c0}) از همان ابتدا مشخص نبوده و مقدار آن با استفاده از حدس و خطا بدست میآید. در این پژوهش از فرضیه کاپستوف¹ به منظور محاسبه چگالی بار الکتریکی روی سیم استفاده شده است. روش کار به این صورت است که میزان شدت میدان الکتریکی بدست آمده در اطراف الکترود سیمی با عدد پیک² محاسبه شده در رابطه (24) مقایسه میشود. عدد پیک حداقل مقدار میدان الکتریکی برای شروع پدیده کرونا است. حدس و خطا برای چگالی بار الکتریکی آنقدر ادامه می ابد تا میزان شدت میدان الکتریکی بیشتر از عدد پیک شود [20].

$$u_x = u_y = u_z = 0 , \ \frac{\partial \xi_y}{\partial y} = 0 , \ q'' = 0 , \ \frac{\partial V}{\partial y} = 0 , \ \frac{\partial \rho_c}{\partial y} = 0 \ \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}} \right)$$
(24)

5- روش حل عددی

برای حل عددی معادلات حاکم، یک برنامه کامپیوتری در زبان برنامه نویسی فرترن³⁹⁰ براساس روش حجم محدود⁴ نوشته شد. برای جلوگیری از انتشار خطای عددی⁵، جملات جابهجایی⁶ و نفوذ⁷ در معادلات به وسیله روش پیوندی⁸ گسسته سازی شدهاند. به منظور پایداری بی قید و شرط بدون نیاز به تنظیم عدد کورانت، از روش گسسته سازی ضمنی کامل⁹ برای حل جریان استفاده شده است. برای تصحیح کوپلینگ بین سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل¹⁰ با شبکه جابجا شده استفاده شده است. شرط اولیه لحظه ورود هوا به دامنه حل میباشد که با توجه به شبه پایا بودن جریان الکتروهیدرودینامیکی، کلیه مقادیر متغیرها با استفاده از رابطه (25) در بازه یایا شده و مقادیر متوسط گیری میشوند. در این بازه زمانی حل عددی تقریبا پایا شده و مقادیر متغیر می باشد.

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{\phi} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{N} \Delta t_i}$$
(25)

در جدول 1 مقادیر ورودی، پارامترهای هدف و محدوده تغییرات آنها ذکر گردیده است.

6- شبکه بندی و بررسی استقلال از شبکه

شبکه محاسباتی تولید شده به صورت سازمانیافته و غیریکنواخت می باشد. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان های نزدیک به سطح آب و الکترود که در آن گرادیانهای شدیدی وجود دارد، از شبکه بندی با تراکم بالا استفاده شده است. در شکل 3 تراکم شبکه تولید شده در اطراف سطح آب و الکترود سیمی نشان داده شده است. تعداد شبکه در جهت Y به اندازه ای است که اندازه شبکه هم اطراف سیم و هم کنار دیوار ریز شود. برای انتخاب شبکهای مناسب برای شبیه شبیه سازی لازم است استقلال از شبکه در ابتدا مورد بررسی قرار گیرد. ضریب انتقال جرم محلی در سطح آب به عنوان پارامتر مناسب برای تحلیل استقلال از شبکه انتخاب شد. از این رو مسئله حاصل برای مقطع با z=6.5 cm بوای (گرفت. نتایج کیلو ولت در شکل 4 به نمایش در آمده است. با توجه به شکل 4، به ازای

جدول 1 پارامترهای ورودی و خروجی در شبیه سازی

Table 1 Input and o	utput paramete	rs in simulation		
محدوده پارامتر	پارامتر	محدوده پارامتر		
خروجى	خروجى	ورودى	پارامىر وروقى	
(7.19-48.66) µ A	شدت جريان	(14-20) kV	ولتاژ	
(0.1-0.973) W	توان مصرفي	(0.4-2.2) m/s	سرعت هوای ورودی	
(0.0-1.04) m/s	سرعت کرونا	26 °C	دمای هوای ورودی	
30-49	عدد شروود	33 %	رطوبت ورودى	



Fig. 2 Boundary conditions for computational domain

شکل 2 شرایط مرزی برای دامنه محاسباتی

1- Kaptsov hypothesis
 2- Peek value

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

3- Fortran 90

8- False diffusion9- Convection7- Diffusion8- Hybrid

9- Fully implicit 10- SIMPLE algorithm

4- Finite Volume Method

تغییر تعداد شبکه از 68000 به 102000 تغییر چندانی در جوابها حاصل نشده است، بنابراین شبکه با تعداد 68000 به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

7- صحت سنجی نتایج

جهت حصول اطمینان از صحت نتایج و اعتبارسنجی آن، نتایج تحلیل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی لای و همکاران [12] مقایسه شده است. در این کار آزمایشگاهی، هوا با سرعت های **1m/s** و **2.2m/s** (اعداد رینولدز 8478 و 18652) وارد کانال می شود. دمای ورودی C^o 25 بوده و رطوبت نسبی ورودی 3% می باشد. دمای آب داخل حفره نیز دمای حباب تر هوای ورودی در نظر گرفته می شود. تغییرات ولتاژ اعمالی از 14 تا 20 کیلو ولت می باشد.

به منظور بررسی میزان نرخ تبخیر، از عدد شروود (رابطه (28)) استفاده می شود. عدد شروود از ضریب انتقال جرم موضعی و متوسط مطابق روابط (26) و (27) بدست می آید. تغییرات عدد شروود نسبت به ولتاژ اعمالی در شکل 5 آمده است. همانگونه که مشاهده می شود، بین نتایج عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی لای و همکاران [12] تطابق مطلوبی برقرار می باشد. میزان بیشینه خطای محاسبه شده حدود 7 درصد است.

$$h_m = \frac{-\rho_a D_v \frac{\partial \xi_v}{\partial y}}{\rho_a (\xi_{ma} - \xi_{min})}$$
(26)

$$\bar{h}_{m} = \frac{1}{L_{w}^{2}} \int_{0}^{L_{w}} \int_{0}^{L_{w}} h_{m} \, \mathrm{d}x \mathrm{d}z$$
(27)

$$Sh = \frac{h_m L_w}{D_v}$$
(28)





شکل 3 نمای دو بعدی شبکه محاسباتی





Fig. 5 Comparison of measured and simulated Sherwood number شکل 5 مقایسه نتایج عددی و شبیه سازی شده برای عدد شروود

$$I = -\int_{A} \rho_{c} b \frac{\partial V}{\partial n} \mathbf{d}A \tag{30}$$

8- بحث و بررسی نتایج 1-8- ارزیابی شاخصهای میدان الکتریکی، میدان جریان و میدان غلظت

شاخصهای توزیع پتانسیل الکتریکی، چگالی بار الکتریکی، جریان الکتریکی و توان مصرفی جهت ارزیابی اثر میدان الکتریکی مطالعه شدهاند. همانگونه که در بخش 4 بیان شد، چگالی بار الکتریکی روی سیم از راه سعی و خطا بدست میآید. ارزیابی شاخصهای میدان الکتریکی در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 نشان می دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی، میزان چگالی بار الکتریکی، جریان الکتریکی و توان مصرفی افزایش می یابند. همچنین مشاهده می شود که مقادیر توان مصرفی بسیار پایین می باشند. برای حالتی که ولتاژ 20 ولت به الکترود سیمی اعمال می شود، توزیع چگالی بار الکتریکی در شکل 6 آمده است. همان گونه که مشاهده می شود، مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود سیمی و همچنین سطح آب بیشینه است و با فاصله گرفتن از سطوح مذکور، چگالی بار الکتریکی کاهش می یابد. همانگونه که مشاهده می شود، مقادیر چگالی بار الکتریکی کاهش می یابد. همانگونه که مشاهده روی سطح مذکور، چگالی بار الکتریکی کاهش می یابد. همانگونه که مشاهده روی سطح آب است. دلیل این گرادیان شدید نیروی دی الکتروفور تیک تولید شده بر روی سطح آب است که به دلیل تغییر ماده دی الکتروفور تیک تولید شده بر روی سطح آب است که به دلیل تغییر ماده دی الکتریک به وجود آمده و سبب افزایش شدید میزان چگالی بار الکتریکی بر روی سطح آب شده است. توزیع پتانسیل الکتریکی در شکل 7 نشان داده شده است. مشخص است

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.1.35.8]

1- Electric power

35 Exp. (Re=18652) [10] Num. (Rc=18652) 30 Exp. (Re=8478) [10] Num. (Re=8478) 25 12 14 16 18 20 22 V(kV) Fig. 4 Grid study for local mass transfer coefficient: Re=8478, $V_0 = 20 \, \text{kV}$ شکل 4 بررسی اثر تعداد شبکه بر ضریب انتقال جرم موضعی در عدد رینولدز 8478 و ولتاژ اعمالي 20 كيلو ولت

جدول 2 نتايج شبيهسازي ميدان الكتريكي

Table 2 Result	s simulated for	the electric field	
توان مصرفي	جريان	چگالی بار الکتریکی	ولتا: اعمالہ د
الكتريكي	الكتريكي	بر روی سیم	(IV)
(W)	(μ Α)	(µ c/m ³)	روی سیم (۳۷)
0.1	07.19	18.78	14
0.195	13.01	32.75	15
0.315	19.71	47.35	16
0.413	24.29	57.13	17
0.544	30.24	71.65	18
0.799	42.06	81.29	19
0.973	48.66	91.11	20

با نزدیک شدن به دیوارها از مقدار آن کاسته میشود. مشاهده میشود که تغییر ماده دیالکتریک سبب ایجاد پرش بر روی سطح آب میشود.

درصد رطوبت نسبی (شکلهای 8 و 9) و خطوط جریان (شکلهای 10 و 11) در سه ولتاژ صفر، 16 و 20 کیلو ولت در اعداد رینولدز 8478 و 11) در سه ولتاژ صفر، 16 و 20 کیلو ولت در اعداد رینولدز 8478 و 18652 ممرزی روی سطح آب نازک میباشد. در نتیجه نفوذ بخارآب به بالای سطح آب به کندی انجام میشود. در این حالت میزان نرخ تبخیر تابعی از سرعت هوای گذرنده از روی سطح آب میباشد. با اعمال میدان الکتریکی بر روی سطح آب یک گردابه تشکیل میشود. بخار آب به وسیله گردابه میتواند به سطح راحی ارحتی ارحتی از سرعت مطح آب یک گردابه تشکیل میشود. بخار آب به وسیله گردابه میتواند به افزایش نرخ تبخیر آب به میاند با اعمال میدان الکتریکی بر روی الح

شکلهای 10 و 11 نشان میدهند که اندازه گردابه تابعی از ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز میباشد. مشاهده میشود که در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، اندازه گردابه افزایش مییابد. همچنین در یک ولتاژ ثابت، با افزایش عدد رینولدز، اندازه گردابه کاهش مییابد. بنابراین اثر میدان الکتریکی در عدد رینولدز 8478 نسبت به عدد رینولدز 18652 بسیار بیشتر است. در اینجا عدد رینولدز 8478 به عنوان عدد رینولدز مرجع معرفی میشود. اعداد رینولدز بیشتر از 8478 به عنوان اعداد رینولدز بالا و اعداد رینولدز کمتر از 8478 به عنوان اعداد رینولدز بالا و اعداد



Fig. 6 Electric potential distribution : $V_0 = 20 \text{ kV}$ شكل 6 توزيع پتانسيل الكتريكى در ولتاژ اعمالى 20 كيلو ولت



قاسم حیدری نژاد و رضا بابایی





Fig. 9 Variation water vapor concentration field: Re=18652 شکل **9** میدان غلظت بخار در عدد رینولدز 18652

8-2- تأثير عدد رينولدز و ولتاژ اعمالي بر نرخ تبخير آب

در شکل 12 تغییرات عدد شروود با ولتاژ اعمالی در اعداد رینولدز مختلف مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می شود، در حالتی که میدان الکتریکی غایب باشد (ولتاژ اعمالی صفر کیلو ولت)، افزایش ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد که به دلیل افزایش جابجایی هوا روی سطح آب میباشد. در حالتی که میدان الکتریکی حضور داشته باشد، ضریب انتقال جرم در Re=3391 بیشینه و پس از آن نزولی میباشد. به منظور توجیه این مطلب نیاز است که تابع خطوط جریان تحت تأثیر میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گیرد. شکل 13 گردابههای تولید شده را در اعداد رینولدز مختلف تحت ولتاژ 20 کیلو ولت نشان میدهد. شکل 13 نشان میدهد که اگر چه میدان الکتریکی در رینولدزهای پایین مانند Re=850 با

تولید گردابه سبب ایجاد آشفتگی بر روی سطح آب شده و سبب افزایش نرخ
تبخیر میگردد، اما تداخل گردابهها زمانی که اندازه آنها بزرگ است، سبب
به هم ریختگی جریان سیال شده و باعث ایجاد موانع بر سر تهویه بخار آب از
سطح آب می گردد. با افزایش عدد رینولدز به تدریج میزان به هم ریختگی
جریان کاهش یافته و گردابه تولید شده بر روی سطح آب سبب افزایش نرخ
تبخیر می گردد. البته در ادامه با افزایش بیشتر عدد رینولدز، حجم گردابه بر
روی سطح آب کاهش یافته و در نتیجه ضریب انتقال جرم کاهش مییابد.
بنابراین در رینولدزهای مختلف میزان تأثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان
و افزایش تبخیر از دو منظر قابل بررسی است. در رینولدزهای پایین توجه به

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

 $\rho_c \,(\mu c/m^3)$



Fig. 7 Space charge density distribution : $V_0 = 20 \text{ kV}$ شکل 7 توزیع چگالی بار الکتریکی در ولتاژ اعمالی 20 کیلو ولت





$$\mathbf{N}_{\rm EHD} = \frac{u_{\rm e}}{u_{\rm in}} \tag{31}$$

$$u_e = \sqrt{\frac{Is}{\rho_a b_a A}} \tag{32}$$

عدد الکتروهیدرودینامیک صفر نشان میدهد که نیروی اینرسی جریان، نیروی غالب در میدان جریان است و در این حالت می تواند از اثر باد کرونا صرفنظر کرد. برای مقادیر بزرگ عدد الکتروهیدرودینامیک نیز میتوان نتیجه گرفت که نیروی الکتریکی بر میدان جریان غالب است. البته در موارد افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم، عدد الکتروهیدرودینامیک، عددی بین صفر و یک است. شکل های 14 و 15 عدد شروود نسبی (sh/sh) را نسبت به عدد الکتروهیدرودینامیک (N_{EHD}) نشان میدهند. عدد شروود نسبی، نسبت عدد شروود با میدان الکتریکی به عدد شروود بدون میدان الکتریکی است.

مشاهده می شود که در اعداد رینولدز پایین مانندRe=3390، عدد شروود نسبی تابعی غیر خطی از عدد الکتروهیدرودینامیک می باشد، اما با افزایش عدد رینولدز میل به خطی شدن افزایش می باید. برای مثال برای



Fig. 10 Streamline for different applied voltages: Re=8478شكل 10 خطوط جريان براى ولتاژهاى مختلف در عدد رينولدز 8478



Fig. 11 Streamline for different applied voltages: Re=18652 شكل 11 خطوط جريان براى ولتاژهاى مختلف در عدد رينولدز 18652

بحث اندازه گردابه و تعداد آن و در رینولدزهای بالا میزان افزایش مومنتوم جریان بر روی سطح آب ضروری میباشد. به منظور دستیابی به حداکثر اثر میدان الکتریکی، نیاز است که عدد رینولدز بررسی شود تا محدوده تأثیر-گذاری میدان الکتریکی مشخص شود.

8-3- بررسی پارامترهای بی بعد

به دلیل حضور هم زمان نیروی الکتریکی و نیروی اینرسی جریان، میتوان عدد الکتروهیدرودینامیک (N_{EHD}) را به عنوان نسبت سرعت باد

80 -	 0	kV
10.34 - 9340	 14	kV
60 -	 18	kV

افزایش عدد رینولدز میل به حطی شدن افزایش مییابد. برای مثال برای
Re=18652، رابطه بین عدد شروود نسبی و عدد الکتروهیدرودینامیک
تقریبا خطی است. همانگونه که مشاهده میشود، میتوان رابطه (33) را بین
عدد شروود نسبی و عدد الکتروهیدرودینامیک در نظر گرفت:
$$\frac{sh}{sh_0} = 1 + a_{EHD}N_{EHD}$$
 (33)
که a_{EHD} بیانگر شیب خط میباشد.
شکل های 14 و 15 نشان میدهند که a_{EHD} تابعی از عدد رینولدز
میباشد. شکل 16 رابطه بین a_{EHD} و عدد رینولدز را نشان میدهد. بنابراین





مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1



Fig. 15 Sherwood number factor versus EHD number at high Reynolds number





میتوان نوشت:

$$\frac{sh}{sh_0} = 1 + (1.63 \times 10^6 \times Re^{-1.56})N_{EHD}$$
(34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (34)
 (35)
 (35)
 (35)
 (35)
 (35)
 (35)
 (35)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)
 (36)

9- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر میدان الکتریکی بر روی نرخ تبخیر از روی سطح آب به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی اثر میدان الکتریکی بر میدان جریان و ضریب انتقال جرم میباشد. در این تحقیق اثر پارامترهای مؤثر از قبیل عدد رینولدز ورودی جریان و ولتاژ اعمالی به الکترودها بررسی شده و نتایج زیر بدست آمده است:

- نیروی تولید شده توسط میدان الکتریکی تابعی از ولتاژ اعمالی بر روی
 الکترود است و با آن رابطه مستقیم دارد.
- میدان الکتریکی سبب تولید نیروی حجمی در سیال شده و سبب ایجاد
 گردابهها بر روی سطح آب می گردد و در نتیجه سبب افزایش تبخیر از
 سطح آب می گردد.





شکل 16 عدد الکتروهیدرودینامیک بر حسب عدد رینولدز

Fig. 14 Sherwood number factor versus EHD number at low Reynolds number

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

قاسم حیدری نژاد و رضا بابایی

- اثر رینولدز بر نرخ تبخیر یک تابع سهموی است، به طوریکه در عدد
 رینولدز 3391 نرخ تبخیر بیشینه است.
 - در رینولدزهای پایین (کمتر از 8478)، اثر میدان الکتریکی بر روی نرخ تبخیر بیشتر است.
- در رینولدزهای بسیار پایین مانند 850، اثر قوی میدان الکتریکی نسبت به جریان ورودی سبب ایجاد چندین گردابه در کانال شده و تعدد گردابه سبب تداخل آنها با گردابه تشکیل شده بر روی سطح آب می شود. این تداخل گردابهها به عنوان یک مانع سبب کاهش نرخ تبخیر می گردد.
- عدد شروود نسبی تابع خطی از عدد الکتروهیدرودینامیک میباشد که شیب خط آن تابعی کاهشی از عدد رینولدز میباشد.

10- فهرست علائم

A	مساحت الكترود زمينى (m ²)
b	قابلیت تحرک یونی (m²V⁻¹s⁻¹)
cp	ضریب حرارتی ویژه (Jkg ⁻¹ k)
$cp_{ m g}$	ضریب حرارتی ویژہ برای بخار آب (Jkg ⁻¹ k)
d_{s}	فاصله از دیوار (m)
D_{v}	ضریب پخش جرمی مولکول های آب در هوا (m²s ⁻¹)
Ε	شدت میدان الکتریکی (Vm ⁻¹)
E_0	مقدار پیک (Vm ⁻¹)
F_e	نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیک (Nm ⁻³)
h_m	ضريب انتقال جرم (ms ⁻¹)
h_{fg}	گرمای نهان تبخیر آب ((Jkg ⁻¹
I	شدت جریان الکتریکی (A)
J	چگالی جریان الکتریکی (Am ⁻¹)
K	ضریب هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
L_s	طول اختلاط برای مقیاس زیر شبکه (m)
$L_{\mathbf{w}}$	طول سطح آب (m)
ṁ	نرخ انتقال جرم (نرخ تبخیر) (kgs ⁻¹)
$m_{ m v}$	جرم بخار آب در مخلوط اشباع (kg)
$m_{ m a}$	جرم هوا در مخلوط بخار اشباع (kg)
N _{ehd}	عدد الكتروهيدروديناميك
Р	فشار (Pa)
$P_{\rm e}$	توان الکتریکی (W)
Prt	عدد پرانتل آشفتگی
P_S	فشار جزئی بخار آب در شرایط اشباع (Pa)
r	شعاع الکترود سیمی (m)

V	ولتاژ الکتریکی (۷)
V_0	ولتاژ الکتریکی بر روی سیم (V)
W	رطوبت مخصوص
W_S	رطوبت مخصوص در شرایط اشباع
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	مختصات کارتزین (m)
علائم يونانى	
ρ	چگالی سیال(³⁻ kgm)
μ	لزجت دینامیکی سیال (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
$ ho_c$	چگالی بار الکتریکی (Cm ⁻³)
$ ho_{c0}$	چگالی بار الکتریکی بر روی سیم (3-Cm)
$ ho_s$	چگالی بار الکتریکی بر روی سطح آب (³⁻ Cm)
ε	ضریب نفوذ پذیری الکتریکی (Fm ⁻¹)
Δ	طول مقياس شبكه (m)
ξ_v	کسر جرمی بخار آب
ξ _{vi} s	کسر جرمی بخار آب بر روی سطح آب
μ_t	لزجت آشفتگی سیال (kgm ⁻¹ s ⁻¹)
arphi	رطوبت نسبى
بالانويسها	
_	مقدار متوسط
\rightarrow	بردار
زيرنويسها	
A	هوا
w	آب
in	ورودى
i,j,k	x-y-z اشاره به x-y-z

/+ -)

11- مراجع

- [1] H. R. Carlon, J. Latham, Enhanced drying rates of wetted materials in electric fields, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 54, No. 2, pp. 117-118, 1992.
- [2] F. Hashinaga, T. R. Bajgai, S. Isobe, N. N. Barthakur, EHD drying of apple slices, *Drying Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 479-495, 1999.
- [3] A. Wolny, Intensification of the evaporation process by electric field, *Chemical Engineering Science*, Vol. 47, No. 3, pp. 551-554, 1992.
- [4] R. B. Lakeh, M. Molki, Targeted heat transfer augmentation in circular tubes using a corona jet, *Journal of Electrostat*, Vol. 70, No. 1, pp. 31-42, 2012.
- [5] F. C. Lai, J. Mathew, Heat transfer enhancement by EHD-induced oscillatory flows, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, No. 9, pp. 861-869, 2006.
- [6] A. Alamgholilou, E. Esmaeilzadeh, Experimental investigation on hydrodynamics and heat transfer of fluid flow into channel for cooling of rectangular ribs by passive and EHD active enhancement methods, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 61-73, 2012.
- [7] H. M. Deylami, N. Amanifard, F. Dolati, R. Kouhikamali, K. Mostajiri, Numerical investigation of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel, *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, No. 4, pp. 656-665, 2013.
- [8] S. O. Ahmedou, M. Havet, Effect of process parameters on the EHD airflow,

- Journal of Electrostatics, Vol. 67, No. 2, pp. 222-227, 2009.
- [9] B .Kamkari, A. Alemrajabi, Investigation of electrohydrodynamicallyenhanced convective heat and mass transfer from water surface, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 138-146, 2010.
- [10] A. Rafi, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of the plasma actuator effects on the flow field and heat transfer coefficient in flat channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 23-30, 2015. (in Persian فارسی)
- [11] P. Alamdari, A. A. Alamrajabi, M. Mirhoseini, Experimental investigation of heat transfer enhancement using EHD in internal natural convection, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 15, pp. 184-195, 2013. (in Persian فارسی)
- [12] F. C. Lai, K. W. Lai, EHD-enhanced drying with wire electrode, *Drying technology*, Vol. 20, No. 7, pp. 1393-1405, 2002.

عدد رينولدز Re فاصله بين الكترود سيمي و الكترود زميني (m) S تانسور نرخ کرنش (s⁻¹) S عدد اشمیت آشفتگی SCt عدد شروود sh عدد شروود بدون ميدان الكتريكي sh₀ دما (C°) Т سرعت (ms⁻¹) и سرعت مشخصه باد یونی (باد کرونا) (ms⁻¹) $u_{\rm e}$

- [17] Gh. Heidarinejad, H. Pasdarshahri, The effects of operational conditions of the desiccant wheel on the performance of desiccant cooling cycles, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 12, pp. 2416-2423, 2010.
- [18] L. Zhongxuana, L. Fengzhib, L. Yingxib, L. Yic, Effect of the environmental atmosphere on heat, water and gas transfer within hygroscopic fabrics, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 163, No. 1, pp. 199-210, 2004.
- [19] Y. Zhiyin, Large-eddy simulation: Past, present and the future, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28, No. 1, pp. 11-24, 2015.
- [20] L. Zhao, K. Adamiak, EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin-plate configuration, *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, No. 4, pp.337-350, 2005.
- [13] M. Huang, F.C. Lai, Numerical study of EHD-enhanced water evaporation, *Journal of Electrostatics*, Vol. 68, No. 4, pp. 364-370, 2010.
- [14] Gh. Heidarinejad, R. Babaei, Numerical investigation of electro hydrodynamics (EHD) enhanced water evaporation using Large Eddy Simulation turbulent model, *Journal of Electrostatics*, Vol. 77, No. 1, pp. 76-87, 2015.
- [15] A. Castellanos, A. Ramos, A. González, N. G. Green, H. Morgan, Electrohydrodynamics and dielectrophoresis in microsystems: scaling laws, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 36, No. 1, pp. 2584–2597, 2003.
- [16] W. M. Kays, E. C. Michael, W. Bernhard, *Convective Heat and Mass Transfer*, Fourth Edittion, pp. 100-125, Stuttgart: McGraw-Hill Companies, 2005.

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1