



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

قاسم حیدری نژاد^{1*}، رضا بابایی²

1- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*تهران، صندوق پستی 14115-143، gheidari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مهر 1394

پذیرش: 04 آذر 1394

ارائه در سایت: 28 آذر 1394

کلید واژگان:

الکتروهیدرودینامیک

باد کرونا

تبخیر آب

تحلیل عددی

چکیده

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 پیش‌بینی جریان و انتقال جرم است. در ادامه اثر مقدار عدد رینولدز و ولتاژ میدان الکتریکی بر میزان نرخ تبخیر تحلیل شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که اعمال ولتاژ قوی به الکتروود سیمی سبب ایجاد اغتشاش و تولید گردابه روی سطح آب می‌شود. مشاهده می‌شود که در یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش ولتاژ اعمالی نرخ تبخیر افزایش می‌یابد، اما در یک ولتاژ ثابت با افزایش عدد رینولدز ورودی، نرخ تبخیر تا عدد رینولدز 3391 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 بیشتر از 3391، یک رابطه خطی بین عدد شروود نسبی و عدد الکتروهیدرودینامیک 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.

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 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.

1- مقدمه

افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم (نرخ تبخیر¹) 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

کمی دارند. همچنین در بسیاری از موارد، افزایش دما سبب کاهش کیفیت محصولات کشاورزی می‌شوند [1،2]. 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 الکتروود سیمی و صفحه‌ای سبب ایجاد میدان الکتریکی قوی در اطراف الکتروود سیمی می‌شود. شدت میدان الکتریکی موجب یونیزاسیون هوا و تشکیل پلازما در اطراف الکتروود سیمی می‌شود. مکانیزم تخلیه کرونا در آزمایشگاه مانند مکانیزم تولید رعد و برق آسمان است. تفاوت این دو در این است که پدیده

1- Evaporation rate

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قطر سیم، عدد ناسلت دو برابر حالت بدون اعمال میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. 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 الکتروود 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 میدان الکتریکی نیز تولید اغتشاش محلی می‌کند، 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 شبیه‌سازی 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

طرحواره مسأله مورد بررسی و محل قرارگیری الکتروود سیمی در شکل 1 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 می‌شود. ابعاد به کار رفته مطابق مدل آزمایشگاهی لای و همکاران [12] در نظر گرفته شده است.

3- معادلات حاکم

در این مطالعه از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی اثر پدیده کرونا بر تبخیر استفاده شده است. معادلات حاکم شامل معادلات میدان الکتریکی و معادلات جریان سیال می‌باشند.

3-1- معادلات میدان الکتریکی

نیروی الکتریکی بر واحد حجم توسط رابطه (1) بیان می‌شود که شامل سه جمله می‌باشد.

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

رعد و برق تابعی از انباشتگی ولتاژ داخل ابرها است و تا اختلاف ولتاژ مناسب ایجاد نگردد، رعد و برق ایجاد نمی‌گردد. در تخلیه کرونا همیشه یک اختلاف ولتاژ مناسب حضور دارد و سبب می‌شود که خازن 1500 جرقه در ثانیه را ایجاد نماید. میدان الکتریکی قوی اطراف الکتروود سیمی سبب یونیزاسیون هوا شده و اجزای موجود در هوا را تبدیل به اتم‌های واکنشی مانند یون مثبت اکسیژن می‌نماید. حرکت یون‌های تولید شده از الکتروود سیمی به سمت الکتروود 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 می‌شود. باد کرونا سبب ایجاد اغتشاش در لایه هوای مجاور سطح آب گردیده و منجر به افزایش آهنگ تبخیر می‌گردد. از آنجا که اعمال میدان الکتریکی موجب تحرک و پویایی سیال می‌گردد، این روش را روش الکتروهیدرودینامیک (EHD)³ می‌نامند [3].

به دلیل ارتباط پیچیده بین معادلات میدان جریان و میدان الکتریکی، اکثر مطالعات به صورت آزمایشگاهی بوده‌اند. اگر چه اخیراً مطالعات عددی محدودی در زمینه اثر میدان الکتریکی بر افزایش نرخ انتقال حرارت (اجباری و طبیعی) انجام شده است، اما مطالعات عددی در زمینه اثر میدان الکتریکی 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. دیلمی و همکاران [7] با بررسی اثر چیدمان الکتروودها در کانال، ترکیب بندی خاصی را یافتند که در آن میزان انتقال حرارت تا 4 برابر افزایش می‌یابد. احمد و هاوت [8] اثر میدان الکتریکی را بر روی الگوی جریان با استفاده از مدل آشفتگی k-ε بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که باد کرونا در ناحیه بین الکتروود سیمی و الکتروود صفحه‌ای سبب ایجاد آشفتگی محلی و افزایش نرخ تبخیر می‌شود. کامکاری و عالم‌رجبی [9] اثر سه پارامتر عدد رینولدز، ولتاژ و فاصله بین الکتروودها را بر روی نرخ تبخیر آب به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اثر عدد رینولدز و ولتاژ بسیار بیشتر از اثر فاصله بین الکتروودها می‌باشد. آن‌ها همچنین افزایش نرخ تبخیر را در ولتاژ 7 تا 40 kV برابر مقدار نرخ تبخیر 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 تأثیرگذار 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 همکاران [11] اثر قطر الکتروود سیمی را بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در کمترین

1- Ionic wind

2- Corona wind

3- Electro hydrodynamic

$$= -\frac{\partial P}{\partial x_i} + [(\mu + \mu_t)\bar{S}_{ij}] + F_{ei} \quad (9)$$

بقای انرژی:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho c_p u_j T) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + F_{ev} \end{aligned} \quad (10)$$

انتقال گونه (بخار آب):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \xi_v) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \xi_v) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_v + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \xi_v}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

در روابط (8) تا (11) μ لزجت دینامیکی، ρ چگالی سیال (هوا و آب)، c_p ضریب حرارتی ویژه، K ضریب هدایتی سیال، Pr_t عدد پراختل اغتشاشی، Sc_t عدد اشمیت اغتشاشی، ξ_v کسر جرمی غلظت بخار آب در هوا و μ_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.

$$F_{ev} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho D_v (c_p T) \frac{\partial \xi_v}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

در معادله (11) ξ_v کسر جرمی بخار آب است و از مقدار آن از رابطه (13) محاسبه می‌شود.

$$\xi_v = \frac{m_v}{m_v + m_a} = \frac{W}{1 + W} \quad (13)$$

$$W = \frac{m_v}{m_a} = 0.622 \frac{\phi P_s}{P - \phi P_s} \quad (14)$$

$$\phi = (1 + \frac{0.622}{W_s}) / (1 + \frac{0.622}{W}) \quad (15)$$

فشار جزئی بخار آب در حالت اشباع از رابطه (16) تعیین می‌گردد [17].

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{P_s}{22087.87}\right) &= \frac{0.01}{T + 273} \sum_{i=1}^8 F_i (0.65 - 0.01T)^{i-1} \\ F_1 &= -741.9242, F_2 = -29.721, F_3 = -11.5, F_4 = -0.86851 \\ F_5 &= 0.1094098, F_6 = 0.439993, F_7 = 0.2520, F_8 = 0.05218 \end{aligned} \quad (16)$$

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

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

در کار احمد و هاوت [8] که مربوط به انتقال حرارت هیدرودینامیکی است، جهت مدل‌سازی آشفتگی از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استفاده شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داده است که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ برای مقادیر عدد ناسلت بیش‌پیشبینی داشته است. به همین دلیل در این مقاله از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)⁷ استفاده شده است که یک روش جدید و کامل‌تر می‌باشد. همچنین برای تصحیح مقادیر لزجت آشفتگی کنار دیوارها، از مدل زیر شبکه⁸ اسماگورینسکی - لی⁹ استفاده شده است. در این مدل لزجت آشفتگی توسط رابطه (18) بدست می‌آید [19].

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (18)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (19)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (20)$$

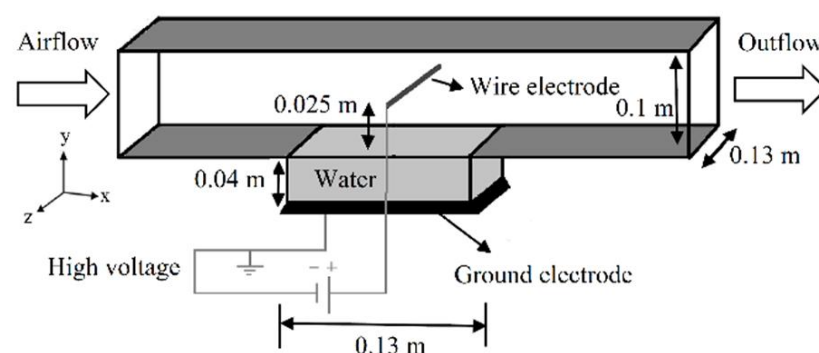


Fig. 1 A schematic view of geometry considered [12]

شکل 1 نمایش شماتیک هندسه محاسباتی مورد بررسی [12]

جمله اول از سمت چپ نیروی کولمب¹ است که سبب تولید باد کرونا می‌شود. جمله دوم و سوم به ترتیب بیانگر دی‌الکتروفورتیک² 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 می‌شوند [15].

معادله ماکسول⁴ (معادله پواسون)⁵:

$$\nabla \cdot E_i = \frac{\rho_c}{\varepsilon} \quad (2)$$

معادله پیوستگی چگالی جریان:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot J_i = 0 \quad (3)$$

قانون اهم⁶:

$$J_i = \rho_c b E_i + \rho_c u_i \quad (4)$$

شدت میدان الکتریکی از رابطه (5) بدست می‌آید.

$$E_i = -\nabla V \quad (5)$$

با ترکیب روابط (2) تا (5) رابطه (6) حاصل می‌شود

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\nabla \rho_c \cdot (b E_i + u_i) + b \frac{\rho_c^2}{\varepsilon} = 0 \quad (7)$$

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

2-3- معادلات جریان سیال

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 سانتی‌گراد می‌باشد. تغییرات خواص ترمودینامیکی هوا و آب در اختلاف دمایی 11 درجه سانتی‌گراد 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].

پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (8)$$

بقای مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)$$

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

7- Large Eddy Simulation
8- Subgrid model
9- Smagorinsky-Lilly

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

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 الکتروهایدرودینامیکی، کلیه مقادیر متغیرها با استفاده از رابطه (25) در بازه 20 الی 30 ثانیه متوسط‌گیری می‌شوند، در این بازه زمانی حل عددی تقریباً پایا شده و مقادیر متوسط در این بازه مقادیر متغیرها در حالت پایا را نشان می‌دهد که در آن ϕ یک متغیر می‌باشد.

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

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 می‌باشد. به منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک به سطح آب و الکتروود 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 الکتروود 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 شبیه‌سازی 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 برای چهار اندازه مختلف تعداد شبکه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل برای مقطع با $z=6.5$ cm برای رینولدز 8478 و ولتاژ اعمالی 20 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 output parameters in simulation

پارامتر ورودی	محدوده پارامتر	پارامتر	محدوده پارامتر
ولتاژ	(14-20) kV	شدت جریان	(7.19-48.66) μ A
سرعت هوای ورودی	(0.4-2.2) m/s	توان مصرفی	(0.1-0.973) W
دمای هوای ورودی	26 °C	سرعت	(0.0-1.04) m/s
رطوبت ورودی	33 %	عدد شرود	30-49

3- Fortran 90

4- Finite Volume Method

8- False diffusion

9- Convection

7- Diffusion

8- Hybrid

9- Fully implicit

10- SIMPLE algorithm

$$L_s = \min(kd_s, C_s \Delta) \quad (21)$$

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

k ثابت فون-کارمن و C_s ثابت اسماکورینسکی است که 0.1 می‌باشد.

4- شرایط مرزی

شرایط مرزی در شکل 2 نشان داده شده است. هوا با سرعت، دما و میزان رطوبت مشخص وارد دامنه محاسباتی می‌شود. 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 می‌باشند. ولتاژ (V) بر روی الکتروود سیمی دارای مقدار ولتاژ اعمال شده ثابت توسط باتری (V_0) و در الکتروود صفحه ای (زمینی) دارای مقدار صفر و در بقیه مکان‌ها دارای شرط نیومن (گرادیان صفر) می‌باشد.

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

$$u_a = u_w \quad (23-a)$$

$$T_a = T_w \quad (23-b)$$

$$\xi_v = \xi_{v,s} \quad (23-c)$$

$$\mu_a \frac{\partial u}{\partial y} \bigg|_a = \mu_w \frac{\partial u}{\partial y} \bigg|_w \quad (23-d)$$

$$K_a \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_a = K_w \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_w + \rho_a D_v h_{fg} \frac{\partial \xi_v}{\partial y} \quad (23-e)$$

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

انرژی روی سطح مشترک می‌باشند.

$$V_a = V_w \quad (23-f)$$

$$\varepsilon_a \frac{\partial V}{\partial y} \bigg|_a - \varepsilon_w \frac{\partial V}{\partial y} \bigg|_w = \rho_s \quad (23-g)$$

$$\rho_{c,a} b_a \frac{\partial V}{\partial y} \bigg|_a = \rho_{c,w} b_w \frac{\partial V}{\partial y} \bigg|_w \quad (23-h)$$

روابط (23-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 الکتروود سیمی دارای یک مقدار ثابت و در بقیه مکان‌ها 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 الکتروود 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 می‌یابد تا میزان شدت میدان الکتریکی بیشتر از عدد پیک شود [20].

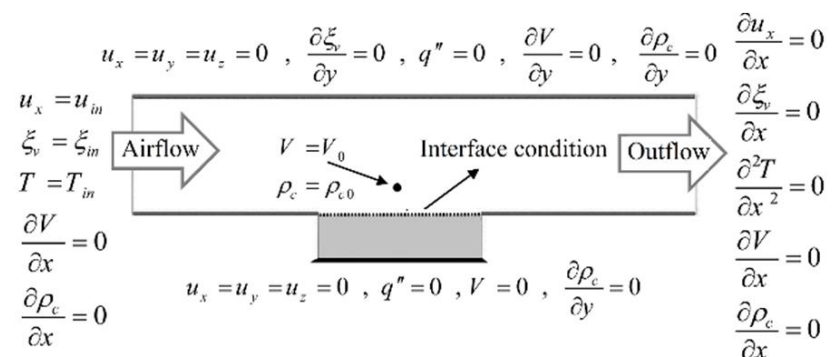


Fig. 2 Boundary conditions for computational domain

شکل 2 شرایط مرزی برای دامنه محاسباتی

1- Kaptsov hypothesis

2- Peek value

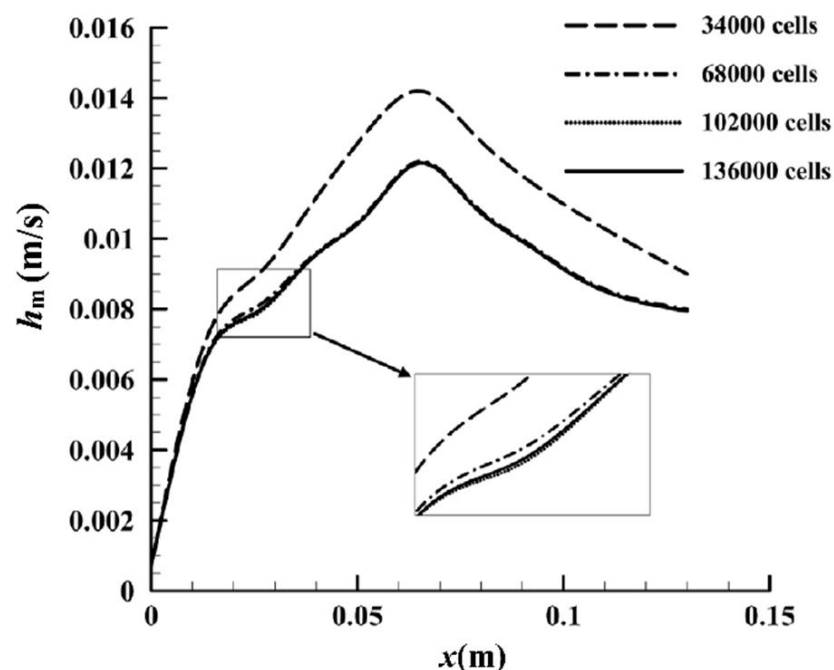


Fig. 5 Comparison of measured and simulated Sherwood number

شکل 5 مقایسه نتایج عددی و شبیه سازی شده برای عدد شروود

یکی از مزیت‌های الکتروهایدروپدینامیک میزان پایین مصرف انرژی می‌باشد. توان مصرفی¹ بعنوان یکی از شاخص‌های مهم الکتروهایدروپدینامیک می‌باشد و از رابطه (29) تعیین می‌گردد.

$$P_e = VI \quad (29)$$

در رابطه (29)، I جریان الکتریکی می‌باشد. جریان الکتریکی با استفاده

از رابطه (30) در اطراف الکترود سیمی تعیین می‌گردد که n بردار عمود بر سطح الکترود می‌باشد.

$$I = - \int_A \rho_c b \frac{\partial V}{\partial n} dA \quad (30)$$

8- بحث و بررسی نتایج

8-1- 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 می‌دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی، میزان چگالی بار الکتریکی، جریان الکتریکی و توان مصرفی افزایش می‌یابند. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر توان مصرفی بسیار پایین می‌باشند. برای حالتی که ولتاژ 20 ولت به الکترود سیمی اعمال می‌شود، توزیع چگالی بار الکتریکی در شکل 6 آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، 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 می‌یابد. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر چگالی بار الکتریکی از $91 \mu\text{C}/\text{m}^3$ به $239 \mu\text{C}/\text{m}^3$ رسیده است. دلیل این گرادیان شدید نیروی دی‌الکتروفورتیک تولید شده بر روی سطح آب است که به دلیل تغییر ماده دی‌الکتریک 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 که پتانسیل الکتریکی در نزدیکی الکترود سیمی دارای مقدار بیشینه است و

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 سرعت‌های 1 m/s و 2.2 m/s (اعداد رینولدز 8478 و 18652) وارد کانال می‌شود. دمای ورودی 26°C بوده و رطوبت نسبی ورودی 33% می‌باشد. دمای آب داخل حفره نیز دمای حباب تر هوای ورودی در نظر گرفته می‌شود. تغییرات ولتاژ اعمالی از 14 تا 20 کیلو ولت می‌باشد.

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

$$h_m = \frac{-\rho_a D_v \frac{\partial \xi_v}{\partial y}}{\rho_a (\xi_{v,s} - \xi_{v,in})} \quad (26)$$

$$\bar{h}_m = \frac{1}{L_w^2} \int_0^{L_w} \int_0^{L_w} h_m dx dz \quad (27)$$

$$\text{Sh} = \frac{\bar{h}_m L_w}{D_v} \quad (28)$$

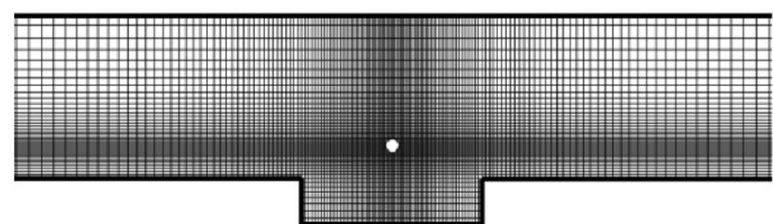


Fig. 3 2D view of computational grid

شکل 3 نمای دو بعدی شبکه محاسباتی

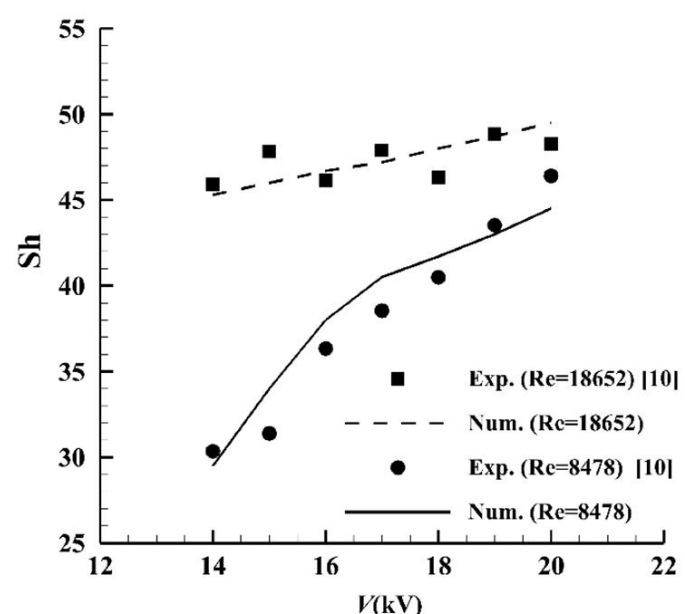
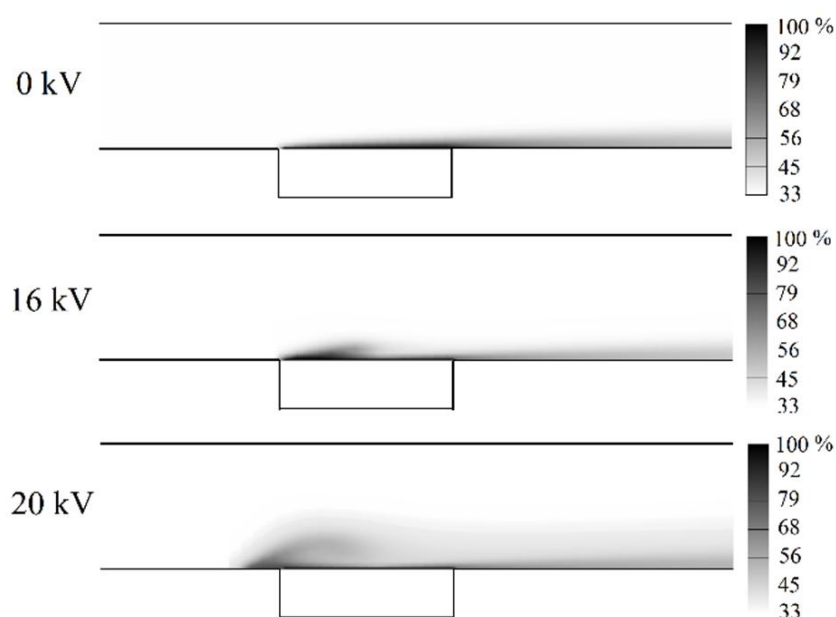


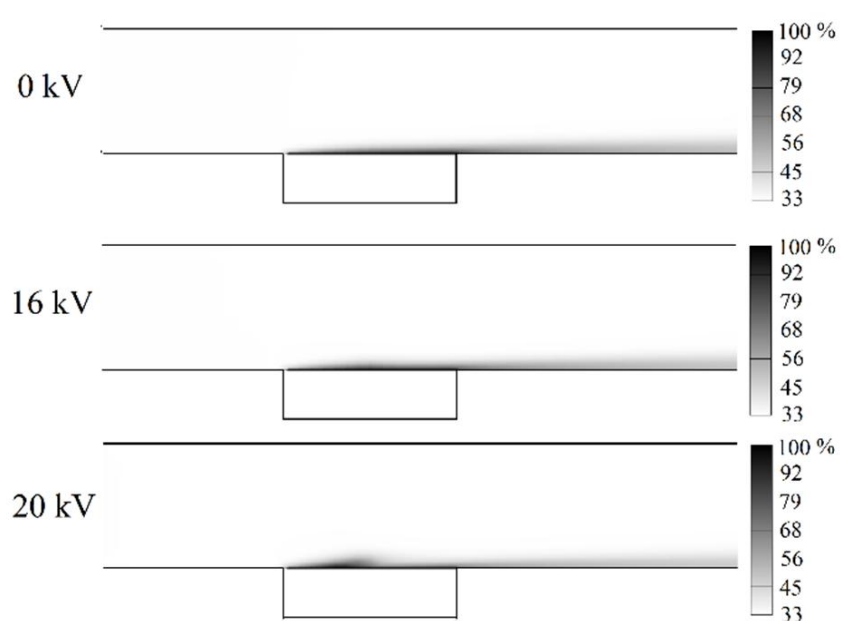
Fig. 4 Grid study for local mass transfer coefficient: $\text{Re}=8478$, $V_0 = 20 \text{ kV}$

شکل 4 بررسی اثر تعداد شبکه بر ضریب انتقال جرم موضعی در عدد رینولدز 8478 و ولتاژ اعمالی 20 کیلو ولت

1- Electric power


 Fig. 8 Variation water vapor concentration field: $Re=8478$

شکل 8 میدان غلظت بخار در عدد رینولدز 8478


 Fig. 9 Variation water vapor concentration field: $Re=18652$

شکل 9 میدان غلظت بخار در عدد رینولدز 18652

8-2- تأثیر عدد رینولدز و ولتاژ اعمالی بر نرخ تبخیر 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 می باشد. در حالتی که میدان الکتریکی حضور داشته باشد، ضریب انتقال جرم در $Re=3391$ بیشینه و پس از آن نزولی می باشد. به منظور توجیه این مطلب نیاز است که تابع خطوط جریان تحت تأثیر میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گیرد. شکل 13 گردابه های تولید شده را در اعداد رینولدز مختلف تحت ولتاژ 20 کیلو ولت نشان می دهد. شکل 13 نشان می دهد 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 می گردد، اما تداخل گردابه ها زمانی که اندازه آن ها 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 می یابد. 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

جدول 2 نتایج شبیه سازی میدان الکتریکی

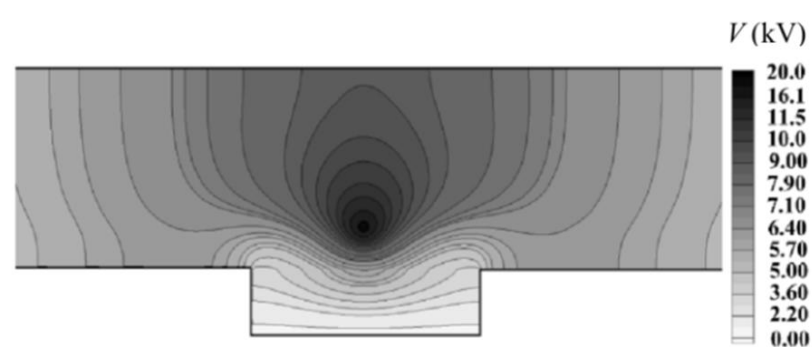
Table 2 Results simulated for the electric field

ولتاژ اعمالی بر روی سیم (kV)	چگالی بار الکتریکی بر روی سیم ($\mu C/m^3$)	جریان الکتریکی (μA)	توان مصرفی الکتریکی (W)
14	18.78	07.19	0.1
15	32.75	13.01	0.195
16	47.35	19.71	0.315
17	57.13	24.29	0.413
18	71.65	30.24	0.544
19	81.29	42.06	0.799
20	91.11	48.66	0.973

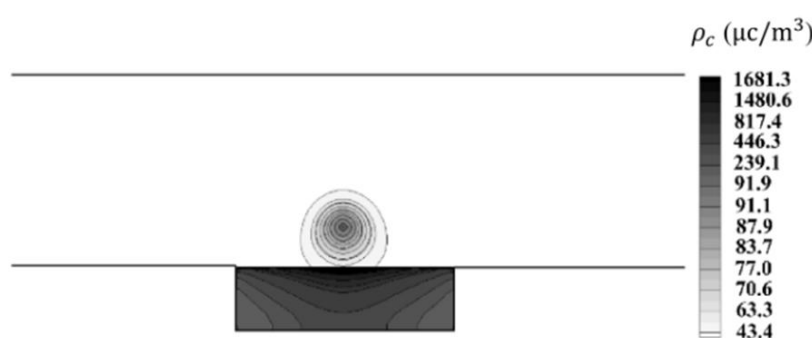
با نزدیک شدن به دیوارها از مقدار آن کاسته می شود. مشاهده می شود که تغییر ماده دی الکتریک سبب ایجاد پرش بر روی سطح آب می شود.

درصد رطوبت نسبی (شکل های 8 و 9) و خطوط جریان (شکل های 10 و 11) در سه ولتاژ صفر، 16 و 20 کیلو ولت در اعداد رینولدز 8478 و 18652 آمده است. در حالتی که میدان الکتریکی وجود نداشته باشد، لایه مرزی روی سطح آب نازک می باشد. در نتیجه نفوذ بخار آب به بالای سطح آب به کندی انجام می شود. در این حالت میزان نرخ تبخیر تابعی از سرعت هوای گذرنده از روی سطح آب می باشد. با اعمال میدان الکتریکی بر روی سطح آب یک گردابه تشکیل می شود. بخار آب به وسیله گردابه می تواند به راحتی از روی سطح آب به میانه کانال نفوذ کرده و بدین ترتیب سبب افزایش نرخ تبخیر آب گردد.

شکل های 10 و 11 نشان می دهند که اندازه گردابه تابعی از ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز می باشد. مشاهده می شود که در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش مقدار ولتاژ اعمالی، اندازه گردابه افزایش می یابد. همچنین در یک ولتاژ ثابت، با افزایش عدد رینولدز، اندازه گردابه کاهش می یابد. 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 می شود. اعداد رینولدز بیشتر از 8478 به عنوان اعداد رینولدز بالا و اعداد رینولدز کمتر از 8478 به عنوان اعداد رینولدز پایین معرفی می شود.


 Fig. 6 Electric potential distribution : $V_0 = 20 \text{ kV}$

شکل 6 توزیع پتانسیل الکتریکی در ولتاژ اعمالی 20 کیلو ولت


 Fig. 7 Space charge density distribution : $V_0 = 20 \text{ kV}$

شکل 7 توزیع چگالی بار الکتریکی در ولتاژ اعمالی 20 کیلو ولت

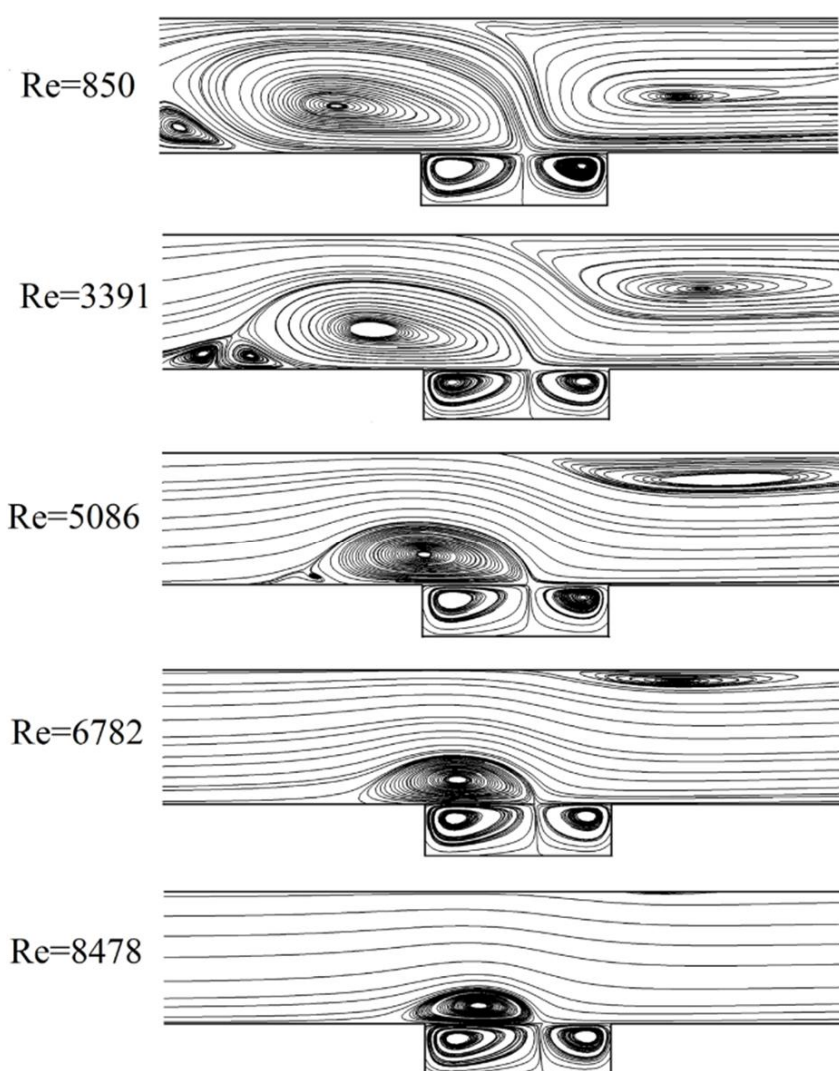


Fig. 13 Effect of Reynolds number on streamlines at 20 kV

شکل 13 اثر عدد رینولدز بر خطوط جریان در ولتاژ 20 کیلو ولت

کرونا به سرعت جریان هوای ورودی تعریف نمود (معادله 31)، سرعت باد کرونا نیز از رابطه (32) محاسبه می گردد.

$$N_{EHD} = \frac{u_e}{u_{in}} \quad (31)$$

$$u_e = \sqrt{\frac{I_s}{\rho_a b_a A}} \quad (32)$$

عدد الکتروهایدروپدینامیک صفر نشان می دهد که نیروی اینرسی جریان، نیروی غالب در میدان جریان است و در این حالت می تواند از اثر باد کرونا صرف نظر کرد، برای مقادیر بزرگ عدد الکتروهایدروپدینامیک نیز می توان نتیجه گرفت که نیروی الکتریکی بر میدان جریان غالب است، البته در موارد افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم، عدد الکتروهایدروپدینامیک، عددی بین صفر و یک است. شکل های 14 و 15 عدد شروود نسبی (sh/sh_0) را نسبت به عدد الکتروهایدروپدینامیک (N_{EHD}) نشان می دهند، عدد شروود نسبی، نسبت عدد شروود با میدان الکتریکی به عدد شروود بدون میدان الکتریکی است.

مشاهده می شود که در اعداد رینولدز پایین مانند $Re=3390$ ، عدد شروود نسبی تابعی غیر خطی از عدد الکتروهایدروپدینامیک می باشد، اما با افزایش عدد رینولدز میل به خطی شدن افزایش می یابد، برای مثال برای $Re=18652$ ، رابطه بین عدد شروود نسبی و عدد الکتروهایدروپدینامیک تقریباً خطی است، همانگونه که مشاهده می شود، می توان رابطه (33) را بین عدد شروود نسبی و عدد الکتروهایدروپدینامیک در نظر گرفت:

$$\frac{sh}{sh_0} = 1 + a_{EHD} N_{EHD} \quad (33)$$

که a_{EHD} بیانگر شیب خط می باشد.

شکل های 14 و 15 نشان می دهند که a_{EHD} تابعی از عدد رینولدز می باشد، شکل 16 رابطه بین a_{EHD} و عدد رینولدز را نشان می دهد، بنابراین

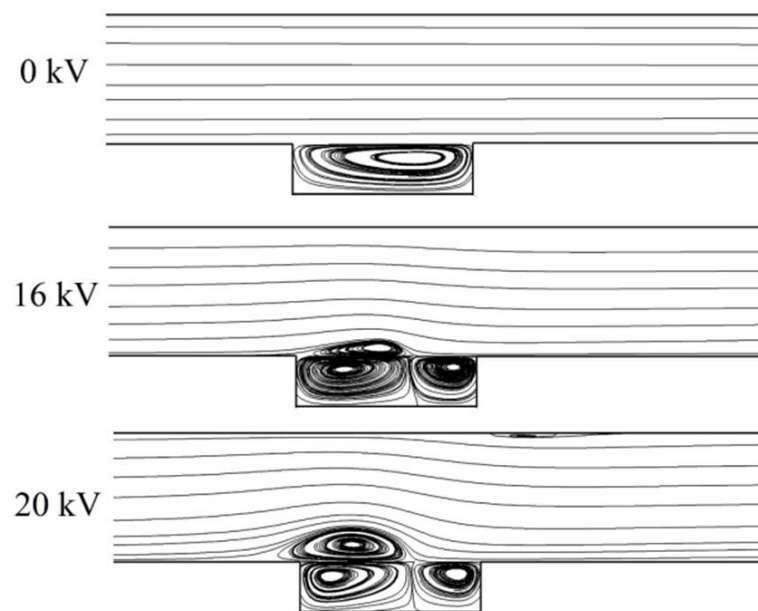


Fig. 10 Streamline for different applied voltages: Re=8478

شکل 10 خطوط جریان برای ولتاژهای مختلف در عدد رینولدز 8478

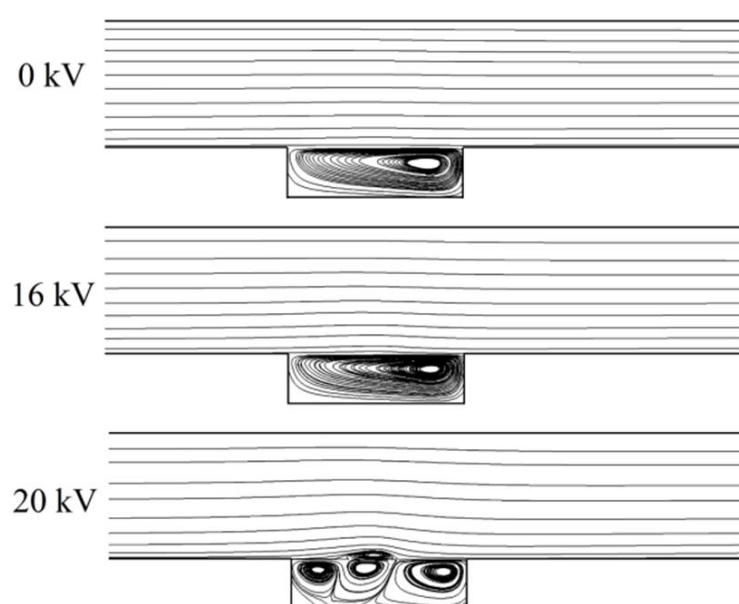


Fig. 11 Streamline for different applied voltages: Re=18652

شکل 11 خطوط جریان برای ولتاژهای مختلف در عدد رینولدز 18652

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

3-8- بررسی پارامترهای بی بعد

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

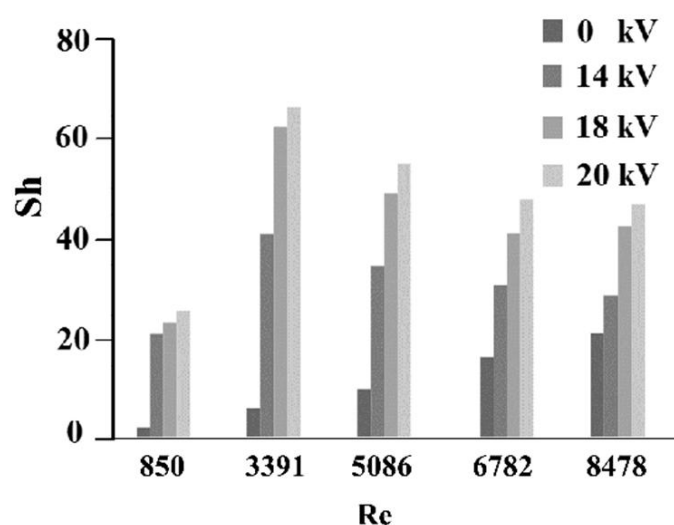


Fig. 12 Sherwood number versus Reynolds number and applied voltage

شکل 12 اثر ولتاژ اعمالی و عدد رینولدز بر عدد شروود

می‌توان نوشت:

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

رابطه (34) ارتباط اعداد بی‌بعد شروود نسبی، عدد الکتروهیدرودینامیک و عدد رینولدز را نشان می‌دهد.

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 الکترودها و با آن رابطه مستقیم دارد.
- میدان الکتریکی سبب تولید نیروی حجمی در سیال شده و سبب ایجاد گردابه‌ها بر روی سطح آب می‌گردد و در نتیجه سبب افزایش تبخیر از سطح آب می‌گردد.

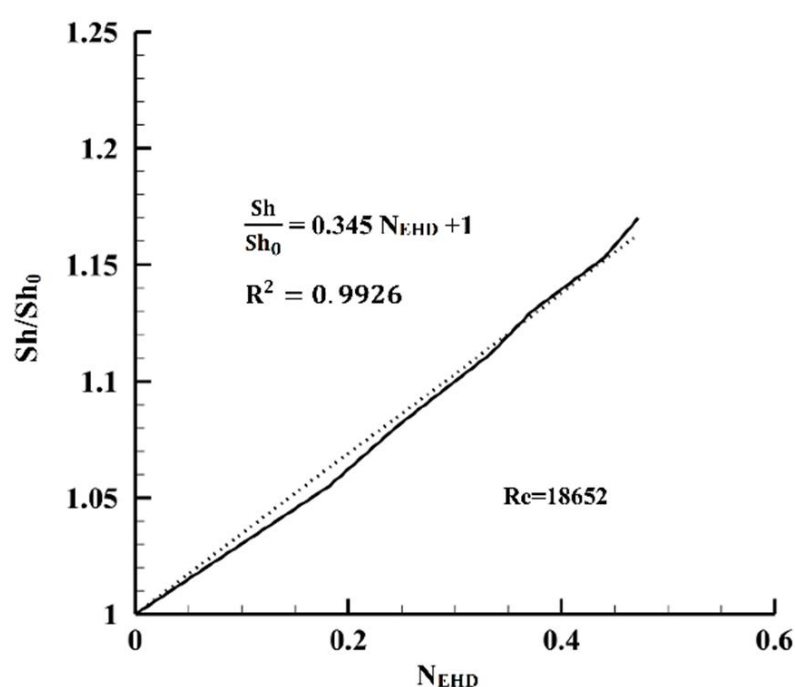
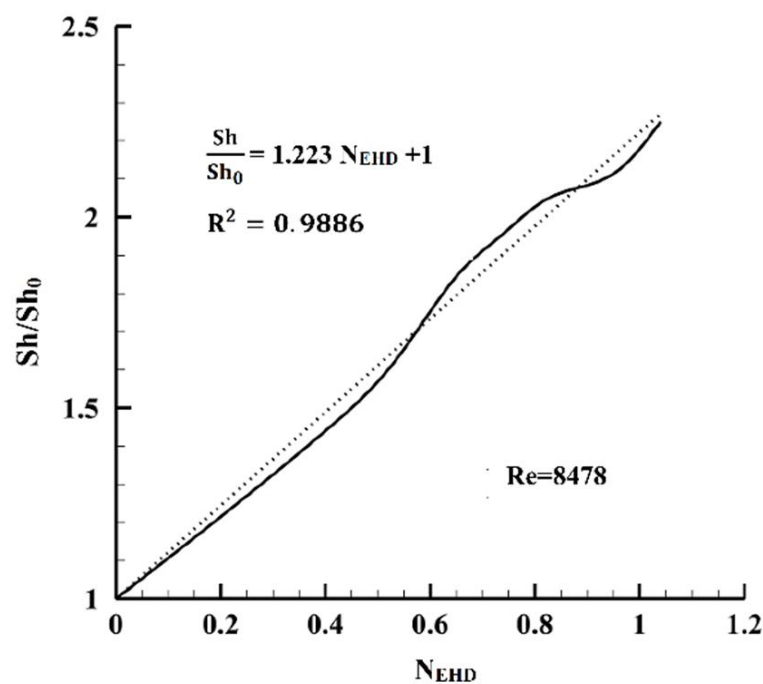


Fig. 15 Sherwood number factor versus EHD number at high Reynolds number

شکل 15 عدد شروود نسبی بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک در اعداد رینولدز بالا

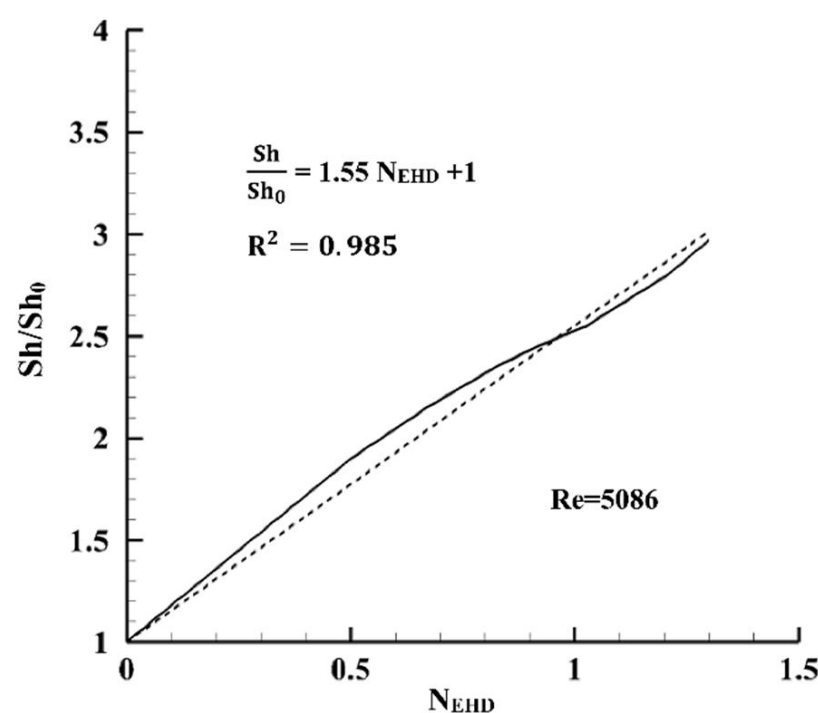
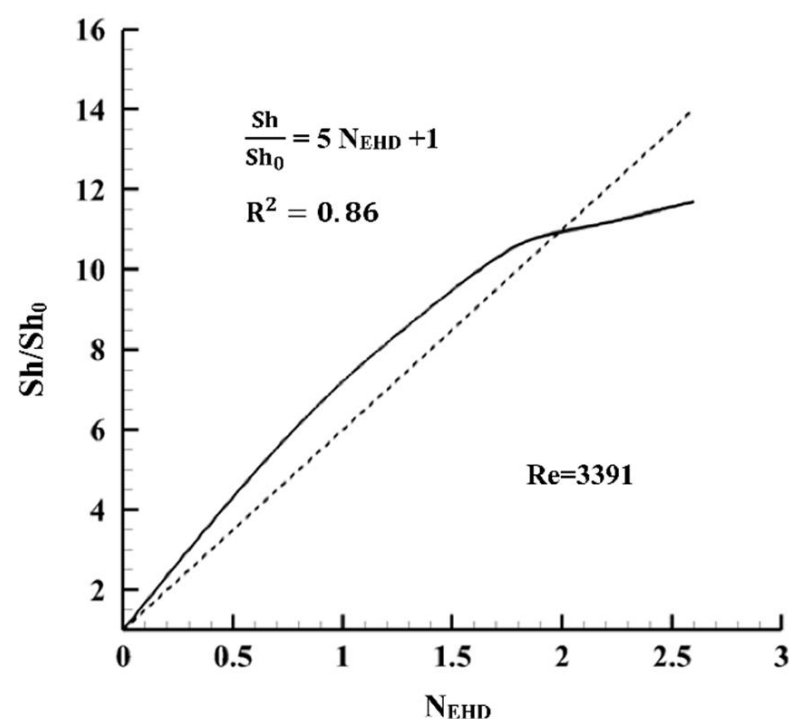


Fig. 14 Sherwood number factor versus EHD number at low Reynolds number

شکل 14 عدد شروود نسبی بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک در اعداد رینولدز پایین

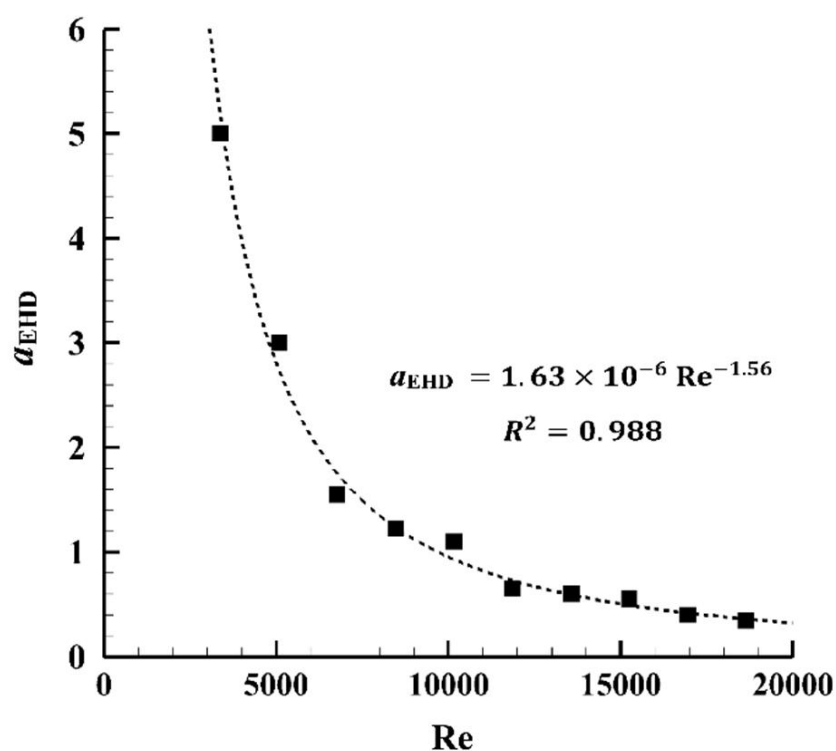


Fig. 16 a_{EHD} versus Reynolds number

شکل 16 عدد الکتروهیدرودینامیک بر حسب عدد رینولدز

- افزایش نرخ تبخیر با ولتاژ اعمالی به الکترودها رابطه مستقیم دارد.

- 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 تعداد 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 می‌گردد.
- عدد شروود نسبی تابع خطی از عدد الکتروهایدرودینامیک می‌باشد که شیب خط آن تابعی کاهشی از عدد رینولدز می‌باشد.

10- فهرست علائم

A	مساحت الکتروود زمینی (m^2)
b	قابلیت تحرک یونی ($m^2V^{-1}s^{-1}$)
cp	ضریب حرارتی ویژه ($Jkg^{-1}k$)
cp_g	ضریب حرارتی ویژه برای بخار آب ($Jkg^{-1}k$)
d_s	فاصله از دیوار (m)
D_v	ضریب پخش جرمی مولکول های آب در هوا (m^2s^{-1})
E	شدت میدان الکتریکی (Vm^{-1})
E_0	مقدار پیک (Vm^{-1})
F_e	نیروی حجمی الکتروهایدرودینامیک (Nm^{-3})
h_m	ضریب 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_w	طول سطح آب (m)
$\dot{m}$	نرخ انتقال جرم (نرخ تبخیر) (kgs^{-1})
m_v	جرم بخار آب در مخلوط اشباع (kg)
m_a	جرم هوا در مخلوط بخار اشباع (kg)
N_{EHD}	عدد الکتروهایدرودینامیک
P	فشار (Pa)
P_e	توان الکتریکی (W)
Pr_t	عدد پرانتل آشفتگی
P_s	فشار جزئی بخار آب در شرایط اشباع (Pa)
r	شعاع الکتروود سیمی (m)
Re	عدد رینولدز
s	فاصله بین الکتروود سیمی و الکتروود زمینی (m)
S	تانسور نرخ کرنش (s^{-1})
Sc_t	عدد اشمیت آشفتگی
sh	عدد شروود
sh_0	عدد شروود بدون میدان الکتریکی
T	دما ($^{\circ}C$)
u	سرعت (ms^{-1})
u_e	سرعت مشخصه باد یونی (باد کرونا) (ms^{-1})

علائم یونانی

V	ولتاژ الکتریکی (V)
V_0	ولتاژ الکتریکی بر روی سیم (V)
W	رطوبت مخصوص
W_s	رطوبت مخصوص در شرایط اشباع
x, y, z	مختصات کارتزین (m)
ρ	چگالی سیال (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی سیال ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ_c	چگالی بار الکتریکی (Cm^{-3})
ρ_{c0}	چگالی بار الکتریکی بر روی سیم (Cm^{-3})
ρ_s	چگالی بار الکتریکی بر روی سطح آب (Cm^{-3})
ϵ	ضریب نفوذ پذیری الکتریکی (Fm^{-1})
Δ	طول مقیاس شبکه (m)
ξ_v	کسر جرمی بخار آب
$\xi_{v,s}$	کسر جرمی بخار آب بر روی سطح آب
μ_t	لزجت آشفتگی سیال ($kgm^{-1}s^{-1}$)
φ	رطوبت نسبی
بالانویس‌ها	
—	مقدار متوسط
→	بردار
زیرنویس‌ها	
A	هوا
w	آب
in	ورودی
i, j, k	3-2-1 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. Esmailzadeh, 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 electrohydrodynamically-enhanced 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.

- [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.