مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1396، دوره 17، شماره 1، ص‌ص 383-393

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل عددی تاثیر میدان الکتریکی بر انتقال جرم از یک جسم مرطوب

فرید دولتی[1]، نیما امانی‌فرد[2*]، حامد محدث دیلمی[3]، خشایار یزدانی[4]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رودسر
4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
* رشت، صندوق پستی 3756، namanif@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 آبان 1395
پذیرش: 20 دی 1395
ارائه در سایت: 29 دی 1395

کلید واژگان:
الکتروهیدرودینامیک
انتقال جرم
بررسی عددی
جسم مرطوب

چکیده

در این مقاله، انتقال جرم در فرآیند خشک‌کردن یک جسم مرطوب تحت تاثیر میدان الکتریکی در یک کانال مسطح به صورت دو بعدی مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. برای حل معادلات میدان‌های الکتریکی، جریان، دما و غلظت در فاز سیال و همچنین میدان‌های دما و رطوبت در جسم مرطوب از روش حجم محدود استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک شبکه سازمان‌یافته، غیریکنواخت و چهار وجهی، با مدل آشفتگی کی- اپسیلون استاندارد انجام شده است. دمای اولیه جسم مرطوب برابر با دمای هوای ورودی می‌باشد. در این مطالعه، ابتدا نتایج عددی با داده‌های تجربی مقایسه شده که از تطابق قابل قبولی برخوردارند. سپس تاثیر عدد رینولدز، ولتاژ اعمالی و مکان الکترود تزریق‌کننده بر نرخ خشک‌کردن جسم مرطوب ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بدون اعمال میدان الکتریکی، با افزایش عدد رینولدز نرخ خشک‌کردن جسم مرطوب افزایش می‌یابد. همچنین در حضور میدان الکتریکی با ثابت ماندن عدد رینولدز، با افزایش ولتاژ اعمالی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر نرخ خشک‌کردن افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج حاکی از آن است که با نزدیک شدن الکترود تزریق‌کننده به سمت لبه حمله جسم مرطوب، تبخیر رطوبت به بیشینه مقدار خود می‌رسد.

Numerical analysis of the electric field effect on mass transfer through a moist object

Farid Dolati[1], Nima Amanifard[1*], Hamed Mohaddes Deylami[2], Khashayar Yazdani[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran
2- Faculty of Technology and Engineering, University of Guilan, Rudsar, Iran
* P.O.B. 3756, Rasht, Iran, namanif@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 November 2016
Accepted 09 January 2016
Available Online 18 January 2017

Keywords:
Electrohydrodynamic
Mass transfer
Numerical investigation
Moist object

ABSTRACT

In this paper, a two-dimensional numerical approach is used to study the mass transfer in drying process of a moist object affected by electric field in a smooth channel. Finite volume method is used to solve governing equations of electric, flow, temperature, and the concentration fields in flow phase, as well as the temperature and the moisture fields in the moist object. The computational methodology includes the use of a structured, non-uniform quadrilateral grid, and the Standard K-ε model was adopted as the turbulence model. The initial temperature of moist object is equal to the air temperature. In this study, firstly, the computed results are compared with the experimental data and the results are in good agree very well. Secondly, the effect of Reynolds number, applied voltage and the position of the emitting electrode on the drying rate of moist object is evaluated. The numerical results show that the drying rate of moist object with increment Reynolds number enhances without the electric field. Also, in presence of electric field, in constant Reynolds the influence of EHD phenomenon on the drying rate increases with increment of applied voltage. In addition, the results show that as the electrode position is established toward the leading edge of moist object, the maximum moisture evaporation reaches.

1- مقدمه

فرآیند خشک‌کردن مواد مرطوب از پدیده‌های مهم در صنعت غذایی، دارویی و ساختمانی به‌شمار می‌رود [1]. با انتقال همزمان حرارت و جرم، بررسی توزیع دما و رطوبت مواد طی فرآیند خشک‌کردن، می‌تواند در طراحی فرآیند خشک‌کردن و کاهش مصرف انرژی موثر باشد.

روش‌های مختلفی برای خشک‌کردن مواد به‌کار گرفته می‌شوند که در استفاده از این روش‌ها، مدت زمان خشک‌کردن و ثبات خواص مواد در حین فرآیند از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. استفاده از جریان هوا با درجه حرارت بالا یکی از روش‌های رایج برای خشک‌کردن جسم مرطوب محسوب می‌شود. اساس این روش تبخیر آب و انتقال آن توسط هوا می‌باشد. در مواردی که مواد به حرارت حساسیت داشته باشند از هوا با درجه حرارت پایین استفاده می‌شود. عمدتاً خشک‌کردن در این روش با انتقال جرم صورت می‌گیرد و به‌دلیل طولانی بودن فرآیند خشک‌کردن، بازدهی پایینی دارد.

یکی از روش‌های نوین به‌منظور بالا بردن بازدهی فرآیند خشک‌کردن،

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

F. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Kh. Yazdani, Numerical analysis of the electric field effect on mass transfer through a moist object, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 383-393, 2017 (in Persian)

استفاده از پدیده الکتروهیدرودینامیک[1] می‌باشد. در این پدیده به‌علت ایجاد جریان ثانویه‌ای به نام باد کرونا[2] می‌توان نرخ انتقال حرارت و جرم را افزایش داد. باد کرونا با برهم زدن الگوی جریان اصلی سیال و آشفته کردن آن موجب کاهش لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی می‌شود و در نتیجه نرخ انتقال حرارت و جرم افزایش می‌یابد. تخلیه کرونا براساس اعمال ولتاژ بالا میان دو الکترود با شعاع انحنای مختلف، برای مثال یک الکترود سیمی (تزریق‌کننده[3]) و یک الکترود صفحه‌ای (جمع‌کننده[4]) به‌وجود می‌آید [2]. در این پدیده میدان الکتریکی در اطراف الکترود تزریق‌کننده موجب یونیزاسیون هوا می‌شود. یون‌های همنام با الکترود تزریق‌کننده بر اثر نیروی الکتریکی به سمت الکترود جمع‌کننده حرکت می‌کنند و در مسیر حرکت خود با برخورد با ذرات خنثی هوا موجب انتقال مومنتم به این ذرات شده و در نتیجه باد کرونا تولید می‌شود.

آیوتا و همکاران [3]، تاثیر آرایش‌های مختلف الکترودهای تزریق‌کننده و جمع‌کننده را بر توزیع میدان الکتریکی و میدان جریان به‌صورت عددی تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که آرایش‌های مختلف الکترودی منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوت در جریان‌های چرخشی می‌شود. همچنین میزان شدت جریان چرخشی با افزایش نیروی اینرسی حاصل از جریان ورودی به کانال، کاهش می‌یابد. احمدو و هاوت [4] و دیلمی و همکاران [5] انتقال حرارت در یک کانال مسطح را در حضور پدیده الکتروهیدرودینامیک به‌صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آن است که تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش شعاع الکترود تزریق‌کننده، در اعداد رینولدز پایین‌تر بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین انتخاب آرایش مناسب الکترودها و فاصله مناسب مابین آن‌ها، تاثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت دارد. مستجیری و همکاران [6] به‌صورت عددی به مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت روی یک پله پسرو تحت تاثیر میدان الکتریکی پرداختند. آن‌ها دریافتند که فاصله بین الکترود تزریق‌کننده از لبه پله تاثیر چشمگیری بر میزان انتقال حرارت و الگوی جریان سیال دارد.

در مقایسه با روش‌های مختلف خشک‌کردن مانند استفاده از هوای داغ، مایکروویو و خشک کردن صوتی، استفاده از محرک الکتروهیدرودینامیک به‌دلیل نداشتن ارتعاش و سروصدا، مصرف انرژی پایین، به‌کارگیری آسان و فرآیند خشک کردن در دمای پایین، منجر به تولید محصول با کیفیت بالا و بدون تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی می‌شود [7]. به‌دلیل پیچیدگی ارتباط بین معادلات میدان جریان، میدان الکتریکی و همچنین پیچیدگی شبیه‌سازی عددی انتقال همزمان حرارت و جرم در مرز جسم مرطوب با سیال عامل، بیشتر تحقیقات انجام شده در این زمینه به‌صورت آزمایشگاهی می‌باشد. بارتاکور [7] در سال 1990 به‌صورت تجربی سرعت خشک‌شدن محلول‌های نمک طعام در حضور محرک الکتروهیدرودینامیک را بررسی نمود. مطالعه او نشان داد که نرخ خشک‌شدن نمک طعام در حضور میدان الکتریکی می‌تواند 3.5 تا 3.9 برابر افزایش یابد. در سال 1994 چن و بارتاکور [8] خشک شدن تکه‌های سیب‌زمینی را تحت تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیک به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نرخ خشک‌شدن برای ضخامت‌های 2 و 4 میلی‌متری 2.5 برابر و برای ضخامت 8 میلی‌متری تا 2.1 برابر افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها دریافتند که استفاده از میدان الکتریکی قوی اثر نامطلوبی روی کیفیت محصولات تولید شده ندارد. کوا و همکاران [9] در سال 2004 مطالعه‌ای روی خشک شدن برنج تحت تاثیر میدان الکتریکی قوی به‌صورت تجربی انجام دادند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که نرخ متوسط خشک شدن برنج در دماهای 25، 40 و 50 درجه سانتی‌گراد به ترتیب 2.83، 1.59 و 1.63 برابر افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که با افزایش میدان الکتریکی، نرخ خشک شدن افزایش می‌یابد. مطالعه تجربی لی و همکاران [10] در سال 2006 بر روی کیک اوکارا نشان داد که نرخ خشک شدن کیک در حضور میدان الکتریکی قوی تا 3.2 برابر افزایش یافته و میزان رطوبت براساس وزن، تا 40 درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سطح کیک خشک شده با این روش هیچ‌گونه ترک و شکافی مشاهده نشده، در صورتی که در اثر خشک کردن با هوای داغ، شکاف و ترک در سطح کیک مشاهده شده است. لیو [11] در سال 1991 حل تحلیلی برای سیستم معادلات انتقال حرارت و جرم با شرط مرزی وابسته به زمان ارائه داده است. نتایج تحلیلی نشان‌دهنده آن است که با تغییر شرط مرزی، حل همگن ثابت می‌ماند، در صورتی که حل خصوصی تغییر می‌کند. همچنین ایشان نتایج حل عددی را برای تخته‌های چوبی ارائه دادند. نتایج حاکی از آن است که با گذر زمان دمای حباب خشک افزایش و توانایی انتقال جرم تعادلی کاهش می‌یابد. مکینده و سیباندا [12] در سال 2008 انتقال حرارت و جرم جریان عبوری از یک سطح افقی متصل به یک جسم متخلخل را در حضور میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تاثیر متغیرهای جریان مانند اعداد اکرت[5]، هارتمن[6] و اشمیت[7] را بر میدان‌های سرعت، دما و غلظت مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین نشان دادند روش حل ارائه شده می‌تواند جایگزین مناسبی برای حل‌های عددی موجود باشد. اسوارامورثی و کانداسامی [13] در سال 2009 تاثیر چگالی بیشینه آب بر انتقال حرارت و جرم در یک محفظه متخلخل را به‌صورت عددی در شرایط مختلف بررسی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که دمای چگالی بیشینه تاثیر چشمگیری بر انتقال حرارت و جرم دارد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که نرخ انتقال حرارت با افزایش تخلخل ماده و اعداد اشمیت و دارسی[8]، بهبود می‌یابد. امانی‌فرد و حقی [14] در سال 2008 به‌صورت عددی خشک شدن جابه‌جایی اجباری یک جسم مرطوب را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن یک آجر مرطوب روی یک صفحه مسطح در بازه عدد رینولدز 50 تا 1000 دریافتند که نرخ خشک کردن با ضریب 1/4 و 1/5 رابطه دارد. دینانی و هاوت [15] در سال 2015 به صورت تجربی با استفاده از روش ترکیبی جابه‌جایی اجباری و میدان الکتریکی قوی روی خشک شدن تکه‌های قارچ را مطالعه نمودند. آن‌ها دریافتند که در سرعت‌های پایین، با افزایش ولتاژ نرخ خشک‌شدن افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادند که در سرعت‌های بالا به‌دلیل تداخل جریان اصلی سیال با جریان کرونا نرخ خشک شدن کاهش می‌یابد. حیدری‌نژاد و بابایی [17,16] به‌صورت عددی تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و افزایش نرخ تبخیر آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی نرخ تبخیر افزایش می‌یابد، اما در یک ولتاژ ثابت با افزایش عدد رینولدز، نرخ تبخیر ابتدا روند صعودی داشته و پس از آن به دلیل کاهش اندازه گردابه‌ها روند نزولی دارد.

اگر چه خشک کردن آجر تحت پارامترهای جریانی توسط امانی فرد و همکاران [14] مورد مطالعه قرار گرفته اما تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک

[1] Electrohydrodynamic
[2] Corona wind
[3] Emitting electrode
[4] Collector electrode
[5] Eckert
[6] Hartmann
[7] Schmidt
[8] Darcy

در مطالعه آن‌ها بررسی نشده است بنابراین هدف تحقیق حاضر بررسی عددی تاثیر پارامترهای ولتاژ اعمالی و سرعت جریان سیال ورودی بر نرخ انتقال جرم از یک آجر به‌عنوان جسم مرطوب در حضور محرک الکتروهیدرودینامیک می‌باشد. لازم به‌ذکر است اکثر مطالعات به‌منظور خشک کردن مواد مرطوب تحت تاثیر محرک الکتروهیدرودینامیک به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است. بنابراین تحلیل عددی به‌منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثرگذاری آن‌ها می‌تواند از اهمیت بالایی در فرآیند خشک کردن برخوردار باشد. همچنین نوآوری کار حاضر نسبت به دیگر مطالعات اشاره شده، بررسی مکان قرارگیری تک الکترود تزریق کننده نسبت به جسم مرطوب به منظور یافتن نقطه‌ای با بیشینه نرخ خشک کردن می‌باشد.

2- هندسه و خواص فیزیکی مسئله

نمای شماتیک هندسه دو بعدی مسئله موردنظر، ابعاد به‌کار رفته و مکان‌های قرارگیری الکترود تزریق‌کننده و جمع‌کننده در "شکل 1" نشان داده شده است.

به‌منظور یافتن بیشینه نرخ انتقال جرم از جسم مرطوب، الکترود تزریق‌کننده در 5 مکان مختلف قرار داده شده است. هوا با سرعت مشخص از سمت چپ وارد کانال می‌شود و با عبور از سطح جسم مرطوب و جذب رطوبت از سمت دیگر کانال خارج می‌شود. خواص فیزیکی هوا و آجر به عنوان جسم مرطوب در جدول 1 آورده شده است.

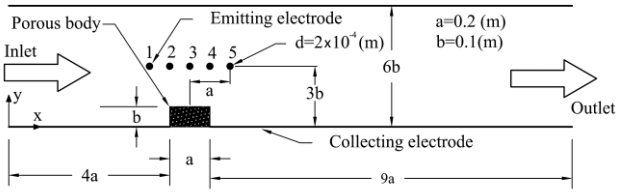


Fig. 1 Schematic view of the computational domain

شکل 1 نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

جدول 1 خواص آجر و هوا [14]

Table 1 Properties of brick and air [14]

پارامتر	مقدار
چگالی جسم خشک (ρ_o)	1.8e03 kg/m^3
ضریب پخش سیال (D)	2.56e-05 m^2/s
ضریب پخش هم‌دما فاز مایع (D_{ml})	1.0e-08 m^2/s
ضریب پخش هم‌دما فاز بخار (D_{mv})	1.0e-12 m^2/s
ضریب پخش غیر هم‌دما فاز مایع (D_{tl})	1.0e-12 m^2/K s
ضریب پخش غیر هم‌دما فاز بخار (D_{tv})	1.0e-12 m^2/K s
ضریب هدایت حرارتی سیال (K)	0.02568 W/m K
ضریب هدایت حرارتی جسم متخلخل (k_p)	1.8 W/m K
ظرفیت گرمایی جسم خشک (c_o)	1.2e03 J/kg K
گرمای نهان تبخیر آب(h_{fg})	2454 kJ/kg K
دمای هوای ورودی (T_{in})	20 °C
غلظت هوای ورودی (C_{in})	8.653e-03 kg/m^3
رطوبت اولیه جسم مرطوب (M)	0.13 kg/kg dry solid

3- معادلات حاکم

میدان‌های جریان سیال، دما و غلظت تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند که در بخش‌های بعدی، این معادلات برای سیال هوا بیان می‌شوند. لازم به ذکر است که برای جسم مرطوب معادلات بقای انرژی و رطوبت نیز استفاده شده است.

3-1- معادلات میدان الکتریکی

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان به‌صورت زیر بیان می‌شود [18]:

$$F_{\mathrm{ei}} = \rho_{\mathrm{c}} E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T \right] \quad (1)$$

در رابطه (1) مولفه‌های دوم و سوم نیروی حجمی پدیده الکتروهیدرودینامیک به‌دلیل ثابت بودن ضریب گذردهی الکتریکی برای سیال تراکم‌ناپذیر هوا صرف‌نظر می‌شوند [18]. بنابراین تنها مولفه موثر در این پدیده، نیروی کولمب خواهد بود.

به‌منظور تعیین نیروی حجمی ناشی از اعمال میدان الکتریکی و اضافه کردن آن به معادلات مومنتم، از معادلات پتانسیل الکتریکی و بقای جریان الکتریکی به‌عنوان معادلات حاکم بر میدان الکتریکی، به‌صورت زیر استفاده می‌شود [19]:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_{\mathrm{c}}}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{c}}}{\partial t} + \nabla \cdot J_{\mathrm{i}} = 0 \quad (3)$$

که در رابطه (3)، J چگالی جریان الکتریکی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_{\mathrm{i}} = \rho_{\mathrm{c}} \beta E_{\mathrm{i}} + \rho_{\mathrm{c}} u_{\mathrm{i}} + \sigma E_{\mathrm{i}} \quad (4)$$

که در این رابطه، شدت میدان الکتریکی از رابطه (5) به‌دست می‌آید.

$$E_{\mathrm{i}} = -\nabla V \quad (5)$$

سه عبارت سمت راست معادله (4) به‌ترتیب تحرک یونی، جابه‌جایی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند. به‌دلیل بالاتر بودن مرتبه بزرگی تحرک یونی نسبت به جابه‌جایی و هدایت الکتریکی، از عبارت‌های دوم و سوم صرف‌نظر می‌شود. با اعمال فرضیات فوق و ترکیب روابط (3) و (4)، قانون بقای جریان الکتریکی به‌صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_{\mathrm{c}}}{\partial t} + \nabla \cdot (-\rho_{\mathrm{c}} \beta \nabla V) = 0 \quad (6)$$

روابط (2)، (5) و (6) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به‌منظور تعیین نیروی کولمب به‌طور همزمان حل می‌شوند.

3-2- معادلات میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی، مومنتم، بقای انرژی و غلظت می‌باشند. از آن‌جایی‌که جریان ثانویه ایجاد شده توسط محرک الکتروهیدرودینامیک به‌صورت موضعی آشفته است، بنابراین نیاز است که جریان سیال به‌صورت آشفته مدل‌سازی عددی شود [20]. در این مطالعه، جهت مدل‌سازی جریان آشفته، مدل دو معادله‌ای کی- اپسیلون استاندارد بر پایه معادلات متوسط‌گیری شده مومنتم به‌کار رفته است. همچنین خواص ترمودینامیکی سیال ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه معادلات حاکم بر جریان سیال آشفته با فرض جریان دوبعدی و تراکم‌ناپذیر بیان شده است [21].

پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}}(\rho u_{\mathrm{i}})=0 \tag{7}$$

مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_{\mathrm{i}})+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}(\rho u_{\mathrm{i}} u_{\mathrm{j}})= -\frac{\partial P}{\partial x_{\mathrm{i}}}+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[(\mu+\mu_{\mathrm{t}})\left(\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial x_{\mathrm{j}}}+\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}\right)\right]+F_{\mathrm{ei}} \tag{8}$$

انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\mathrm{p}} T)+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}(\rho c_{\mathrm{p}} u_{\mathrm{i}} T)=\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\left(K+\frac{\mu_{\mathrm{t}} c_{\mathrm{p}}}{\mathrm{Pr}_{\mathrm{t}}}\right)\frac{\partial T}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] \tag{9}$$

غلظت:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\mathrm{p}} C)+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}(\rho c_{\mathrm{p}} u_{\mathrm{i}} C)=\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\left(D+\frac{\mu_{\mathrm{t}} c_{\mathrm{p}}}{\mathrm{Sc}_{\mathrm{t}}}\right)\frac{\partial C}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] \tag{10}$$

در رابطه (8)، F_{ei} بیانگر نیروی کولمب می‌باشد. در روابط (8) تا (10)، μ_{t} لزجت آشفتگی می‌باشد که در مدل کی- اپسیلون استاندارد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [21]:

$$\mu_{\mathrm{t}}=\rho C_{\mu}\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{11}$$

در رابطه (11)، k انرژی جنبشی آشفتگی و ε نرخ پراکندگی انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند که با استفاده از روابط (12) و (13) به‌دست می‌آیند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}}(\rho k u_{\mathrm{i}})=\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\mathrm{k}}}\frac{\partial k}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] +\left[\mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial x_{\mathrm{j}}}+\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}\right)-\frac{2}{3}\rho\delta_{\mathrm{i,j}}k\right]\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}-\rho\varepsilon \tag{12}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{i}}}(\rho\varepsilon u_{\mathrm{i}})=\frac{\partial}{\partial x_{\mathrm{j}}}\left[\frac{\mu_{\mathrm{t}}}{\sigma_{\varepsilon}}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_{\mathrm{j}}}\right] +C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left[\mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial u_{\mathrm{i}}}{\partial x_{\mathrm{j}}}+\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}\right)-\frac{2}{3}\rho\delta_{\mathrm{i,j}}k\right]\frac{\partial u_{\mathrm{j}}}{\partial x_{\mathrm{i}}}-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{13}$$

همچنین اعداد ثابت معادلات کی- اپسیلون استاندارد به صورت زیر تعریف می‌شوند [21]:

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_{\mu}=0.09, \sigma_{\mathrm{k}}=1, \sigma_{\varepsilon}=1.3 \tag{14}$$

3-3- معادلات حاکم برای جسم مرطوب

معادلات بقای رطوبت و انرژی برای جسم مرطوب که از قانون فیک و قانون دارسی به دست آمده است، عبارتند از[14]:

$$\frac{\partial M}{\partial t}=(D_{\mathrm{tl}}+D_{\mathrm{tv}})\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) +(D_{ml}+D_{\mathrm{mv}})\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \tag{15}$$

$$(c_0+m_{\mathrm{l}}c_{\mathrm{l}}+m_{\mathrm{v}}c_{\mathrm{v}})\frac{\partial T}{\partial t}=(h_{\mathrm{fg}}D_{\mathrm{mv}})\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) +\left(\frac{k}{\rho_0}+h_{\mathrm{fg}}D_{\mathrm{tv}}\right)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{16}$$

4- شرایط مرزی

در ورودی‌کانال، هوا دارای سرعت یکنواخت، دما و رطوبت مشخص می‌باشد. شرط توسعه‌یافتگی برای تمامی متغیرهای مسئله در مرز خروجی در نظر گفته شده است. دیواره‌های بالا و پایین به‌صورت آدیاباتیک و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. مشخصات سیال در مرزهای مورد نظر در جدول 2 ذکر شده است. برای محاسبه کی و اپسیلون در نزدیکی دیواره‌های جامد از رابطه (17) استفاده شده است.

$$k=\frac{(u^*)^2}{\sqrt{c_{\mu}f_{\mu}}}\ ,\ \varepsilon=\frac{(u^*)^3}{\kappa y} \tag{17}$$

که u^* سرعت اصطکاکی است و از رابطه (18) به‌دست می‌آید.

$$u^*=\sqrt{\frac{\tau_{\mathrm{w}}}{\rho}} \tag{18}$$

که در آن τ_{w} تنش برشی دیواره و از رابطه (19) قابل محاسبه است.

$$\tau_w=\frac{\mu}{\rho}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{\mathrm{w}} \tag{19}$$

شرایط مرزی در مرز جامد با هوا مطابق زیر می‌باشد [14]:

پیوستگی دما:

$$T_{\mathrm{f}}=T_{\mathrm{s}} \tag{20}$$

غلظت سیال در فصل مشترک جسم مرطوب و سیال، تابعی از دما و رطوبت می‌باشد. رطوبت نسبی با توجه به رابطه (21) به‌دست می‌آید [23] .

$$\phi=1-\exp(-17M^{-0.6}) \tag{21}$$

رابطه (21)، رابطه دفع همدمای اصلاح شده‌ی هندرسون می‌باشد. این رابطه به‌منظور تعیین رطوبت نسبی موضعی در سطح مشترک جسم مرطوب و هوا استفاده می‌شود و رابطی بین جسم مرطوب و سیال هوا می‌باشد. لازم به ذکر است که ثابت‌های رابطه فوق از طریق سعی و خطا به‌دست می‌آیند.

همچنین غلظت سیال با توجه به روابط ترمودینامیکی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C=\frac{2.167\times\phi\times P_{\mathrm{g}}}{T} \tag{22}$$

که در رابطه (22) P_{g} فشار بخار اشباع در دمای موضعی می‌باشد.

تعادل شار حرارتی:

$$\left(k_{\mathrm{p}}+\rho_0 h_{\mathrm{fg}}D_{\mathrm{tv}}\right)\frac{\partial T}{\partial n}+\rho_0 h_{\mathrm{fg}}D_{\mathrm{mv}}\frac{\partial M}{\partial n} =K\frac{\partial T_{\mathrm{f}}}{\partial n}+h_{\mathrm{fg}}D\frac{\partial C}{\partial n} \tag{23}$$

تعادل شار اجزاء:

$$\rho_0\left(D_{\mathrm{tv}}\frac{\partial T}{\partial n}+D_{\mathrm{mv}}\frac{\partial M}{\partial n}\right)=D\frac{\partial C}{\partial n} \tag{24}$$

همچنین شرایط مرزی پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی در کل دامنه محاسباتی در جدول 3 نشان داده شده است.

تعیین شرط مرزی چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود تزریق‌کننده به‌طور مستقیم قابل محاسبه نیست و با سعی و خطا به‌دست می‌آید. در این مطالعه از فرضیه کاپتزوف و قانون پیک به منظور تعیین چگالی بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتزوف بیان می‌کندکه بعد از شروع تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند. براساس این فرضیه چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود تزریق‌کننده حدس زده می‌شود و میدان الکتریکی محاسبه و سپس با عدد پیک محاسبه شده از رابطه (25) مقایسه می‌شود. این

جدول 2 شرایط مرزی دما، غلظت و سرعت سیال

Table 2 Boundary conditions for temperature, concentration and velocity

مرز	دما	غلظت	سرعت
$x=0$ m	$T=T_0$	$C=C_0$	$u=u_0$
$x=2.8$ m	$\partial T/\partial x=0$	$\partial C/\partial x=0$	$\partial u/\partial x=0$
الکترود تزریق‌کننده	$\partial T/\partial n=0$	$\partial C/\partial n=0$	$u=0$
$y=0$ m	$\partial T/\partial y=0$	$\partial C/\partial y=0$	$u=0$
$y=0.6$ m	$\partial T/\partial y=0$	$\partial C/\partial y=0$	$u=0$

جدول 3 شرایط مرزی پتانسیل و چگالی بار الکتریکی

Table 3 Boundary conditions for potential and electric charge density

مرز	پتانسیل الکتریکی	چگالی بار الکتریکی
$x = 0$ m	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial \rho_c/\partial x = 0$
$x = 2.8$ m	$\partial V/\partial x = 0$	$\partial \rho_c/\partial x = 0$
الکترود تزریق‌کننده	$V = V_0$	قانون پیک
$y = 0$ m	$V = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$
$y = 0.6$ m	$\partial V/\partial y = 0$	$\partial \rho_c/\partial y = 0$
مرز جسم متخلخل با سیال	$\partial V/\partial n = 0$	$\partial \rho_c/\partial n = 0$

روند سعی و خطا تا برابر شدن میدان الکتریکی به‌دست آمده از حل عددی و مقدار حاصل از رابطه پیک ادامه می‌یابد [22].

$$E_0 = 3.1 \times 10^6 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r}}\right) \tag{25}$$

5- روش حل عددی

به‌منظور حل عددی معادلات حاکم، از زبان برنامه‌نویسی فرترن[1] 95 استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. ابتدا معادلات میدان الکتریکی به روش صریح و پایا، حل می‌شوند. برای این منظور بعد از یافتن مقدار مناسب چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود تزریق‌کننده، حل تا همگرایی میدان‌های پتانسیل و چگالی بار الکتریکی ادامه می‌یابد. به‌منظور تشخیص همگرایی، معیار کاهش باقیمانده‌های تراز شده 10^{-7} می‌باشد. پس از همگرا شدن حل، نیروی کولمب برای افزودن به معادله مومنتم محاسبه می‌شود. در ادامه معادلات جریان سیال در حالت ناپایا و توسط حل‌کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. برای جلوگیری از انتشار خطای عددی، جملات جابه‌جایی و نفوذ در این معادلات به روش پیوندی[2] گسسته‌سازی شده و همچنین برای تصحیح ارتباط ارتباط سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل[3] استفاده شده است. با محاسبه دما و رطوبت در مرز جسم مرطوب با هوا، شرایط مرزی مورد نیاز برای حل معادلات جسم مرطوب نیز فراهم می‌شود. محاسبات مربوط به معادلات جریان سیال و جسم مرطوب تا دست‌یابی به مانده‌های حداکثر 10^{-6} انجام شده است. الگوریتم حل عددی در "شکل 2" نشان داده شده است. کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای با 3.9 گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسباتی حدود 2-4 ساعت برای معادلات جریان الکتریکی و حدود 20-25 ساعت برای معادلات جریان سیال و ماده متخلخل می‌باشد.

6- شبکه محاسباتی و استقلال حل عددی از شبکه

شبکه محاسباتی ایجاد شده به صورت سازمان‌یافته و غیریکنواخت می‌باشد. به‌منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک دیواره، الکترود تزریق‌کننده و لبه جسم مرطوب که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است. در "شکل 3" نمایی از شبکه محاسباتی، شبکه‌بندی ایجاد شده در اطراف الکترود تزریق‌کننده و جسم مرطوب نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، مقدار رطوبت جسم مرطوب در لبه حمله با گذر زمان به‌عنوان پارامتر

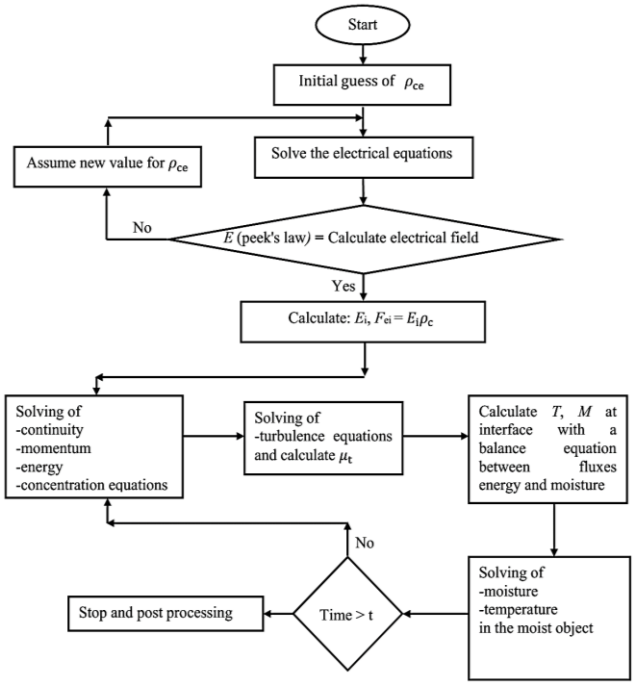


Fig. 2 Flowchart of numerical solution

شکل 2 فلوچارت حل عددی

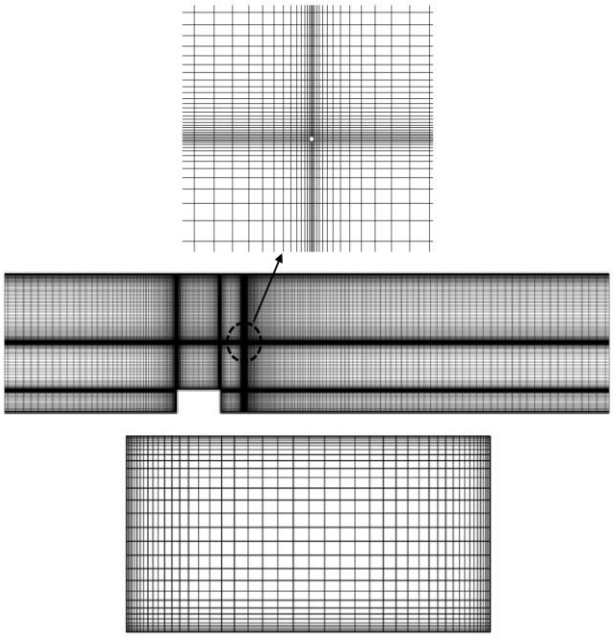


Fig. 3 The view of the computational grid

شکل 3 نمایی از شبکه محاسباتی

استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در "شکل 4" مشاهده می‌شود، برای مطالعه استقلال از شبکه از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز 200 استفاده شده است. با توجه به "شکل 4" واضح است که با تغییر تعداد شبکه از 39200 به 45000 تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد 39200 به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. لازم به ذکر است که استقلال از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

[1] Fortran
[2] Hybrid
[3] SIMPLE

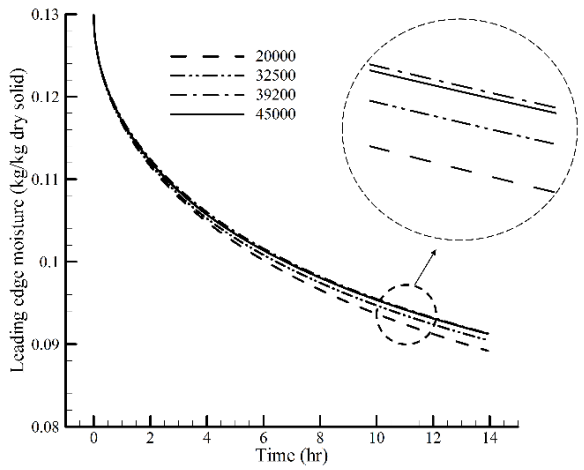


Fig. 4 Moisture content in leading edge for different sets of grids

شکل 4 توزیع رطوبت در لبه حمله برای شبکه‌های مختلف

7- اعتبارسنجی نتایج

جهت بررسی صحت نتایج عددی، منحنی خشک شدن جسم مرطوب برحسب زمان با نتایج تجربی موروگسان و همکاران [23] برای جریان هوا با عدد رینولدز 200 در "شکل 5" مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی و داده‌های تجربی با دقت قابل قبولی مطابقت دارند.

همچنین به‌منظور اعتبارسنجی نتایج میدان الکتریکی و تعیین دقیق نیروی کولمب، نتایج کار حاضر با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [24] مقایسه شده است. آن‌ها به‌صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. در "شکل 6" نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی مقایسه و تطابق خوبی مشاهده گردید.

8-بحث و بررسی نتایج

به‌منظور ارزیابی نرخ انتقال جرم از جسم مرطوب، از پارامتر بی‌بعد عدد شروود متوسط استفاده شده است. عدد شروود متوسط از میانگین ضریب انتقال جرم موضعی (رابطه (27)) در سطح مرطوب جسم مرطوب مطابق رابطه (28) محاسبه می‌شود.

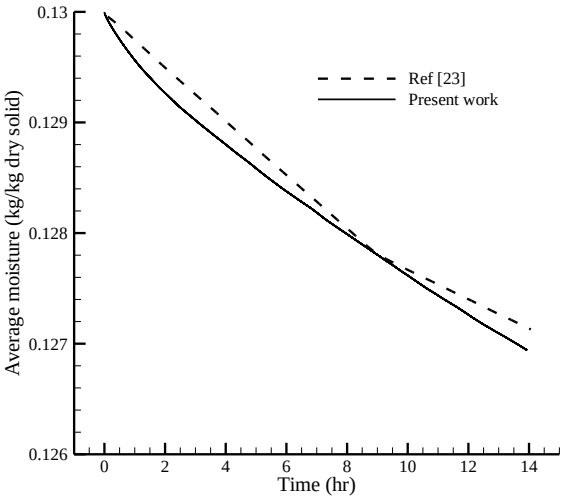


Fig. 5 Average moisture comparison of the present work, and the result of Murugesan et al. [23]

شکل 5 مقایسه رطوبت متوسط در کار حاضر با نتایج موروگسان و همکاران [23]

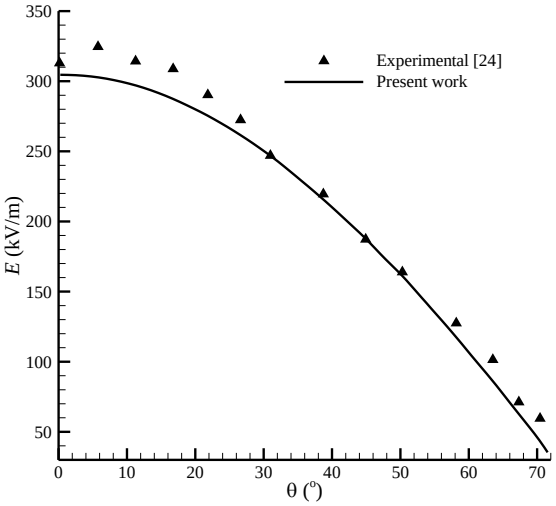


Fig. 6 Electric field distribution at the smooth plate, V=18 kV

شکل 6 توزیع میدان الکتریکی بر روی صفحه تخت در ولتاژ اعمالی 18 کیلو ولت

$$h = \frac{-D\dfrac{\partial c}{\partial n}}{(C_{\mathrm{w}} - C_{\mathrm{in}})} \tag{26}$$

$$\bar{h} = \frac{1}{L_{\mathrm{l}}}\int_0^{L_{\mathrm{l}}} h_{\mathrm{l}}\,dy + \frac{1}{L_{\mathrm{t}}}\int_0^{L_{\mathrm{t}}} h_t\,dx + \frac{1}{L_{\mathrm{r}}}\int_0^{L_{\mathrm{r}}} h_{\mathrm{r}}\,dy \tag{27}$$

$$\overline{\mathrm{Sh}} = \frac{\bar{h}L_{\mathrm{s}}}{D} \tag{28}$$

در رابطه (28)، L_{s} سطح مرطوب جسم مرطوب شامل سطوح بالایی و جانبی ($L_{\mathrm{s}} = L_{\mathrm{l}} + L_{\mathrm{t}} + L_{\mathrm{r}}$) می‌باشد. به‌منظور ارزیابی تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک، ζ به‌صورت نسبت عدد شروود متوسط در حضور میدان الکتریکی به عدد شروود متوسط بدون حضور میدان الکتریکی تعریف شده است.

$$\zeta = \frac{\overline{\mathrm{Sh}}_{\mathrm{EHD}}}{\overline{\mathrm{Sh}}_{\mathrm{non-EHD}}} \tag{29}$$

8-1- خشک‌کردن آجر بدون میدان الکتریکی

توزیع رطوبت درون جسم مرطوب در زمان‌های مختلف و بدون حضور میدان الکتریکی در "شکل 7" نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده در عدد رینولدز 500 حاکی از آن است که نرخ انتقال جرم در اطراف لبه حمله بیشتر از سایر سطوح جسم مرطوب می‌باشد و همان‌گونه که مشاهده می‌شود با گذر زمان، خشک شدن به درون جسم مرطوب نفوذ می‌کند.

به‌منظور بررسی این پدیده، خطوط جریان اطراف جسم مرطوب در "شکل 8" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌دلیل تراکم خطوط جریان و بالا بودن نرخ جرمی سیال عبوری در لبه حمله، نرخ انتقال جرم در این منطقه افزایش می‌یابد. همچنین نرخ انتقال جرم از سطح سمت راست جسم مرطوب به‌دلیل جدایش جریان و کاهش مومنتم در این ناحیه کاهش می‌یابد.

در "شکل 9" منحنی خشک کردن جسم مرطوب در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز به علت افزایش نرخ جرمی سیال عبوری از سطوح جسم مرطوب رطوبت متوسط جسم مرطوب با گذر زمان کاهش و در نتیجه نرخ خشک‌شدن جسم مرطوب افزایش می‌یابد.

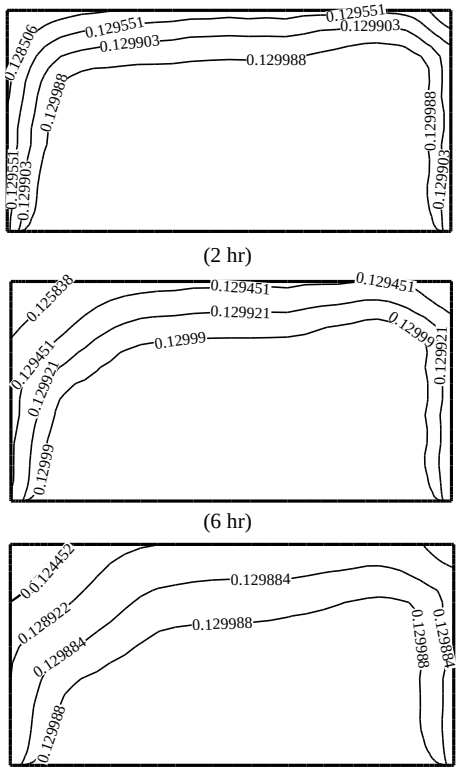


Fig. 7 Moisture content distributions during drying process, Re=500

شکل 7 توزیع رطوبت در طی فرآیند خشک‌کردن، Re=500

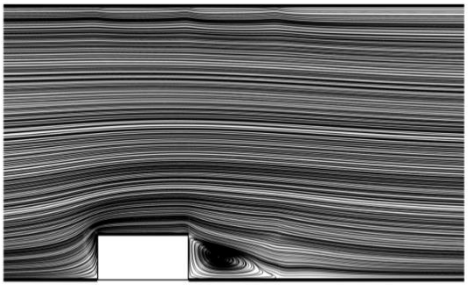


Fig. 8 Streamlines around the moist object, Re=500

شکل 8 خطوط جریان اطراف جسم مرطوب ، Re=500

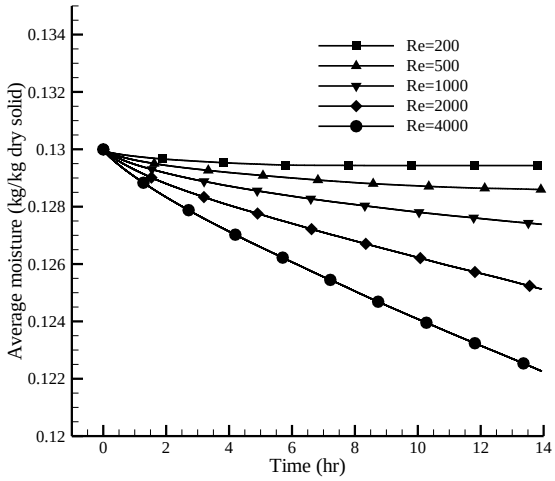


Fig. 9 Moisture content moist object at different Reynolds numbers

شکل 9 رطوبت متوسط جسم مرطوب در اعداد رینولدز مختلف

8-2- تاثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان، دما و غلظت هوا

توزیع پتانسیل و چگالی بار الکتریکی متناظر با ولتاژ اعمالی 18 کیلو ولت برای حالتی که الکترود تزریق‌کننده در وضعیت 3 قرار داشته باشد، در "شکل 10 و 11" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، گرادیان الکتریکی در نواحی اطراف الکترود تزریق‌کننده نسبت به سایر نواحی بیشتر است و در نتیجه میدان الکتریکی قوی‌تری در اطراف الکترود تزریق‌کننده ایجاد می‌شود. از طرفی دیگر مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی الکترود تزریق‌کننده بیشینه است و با نزدیک شدن به دیوارها کاهش می‌یابد. بنابراین، نیروی کولمب در مجاورت الکترود تزریق‌کننده بیشتر است و انتظار می‌رود جریان ثانویه حاصل از اعمال میدان الکتریکی در زیر سطح مذکور دارای قدرت بیشتری باشد.

به‌منظور بررسی تاثیر میدان الکتریکی بر خشک کردن جسم مرطوب، خطوط جریان در اطراف جسم مرطوب برای پیکربندی حالت 3 و در ولتاژهای اعمالی 18 کیلو ولت در "شکل 12" ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جریان ثانویه حاصل از اعمال میدان الکتریکی موجب ایجاد دو گردابه در جریان سیال و دو گردابه در نواحی اطراف جسم مرطوب می‌شود. همچنین انتظار می‌رود که با افزایش ولتاژ اعمال شده به الکترود تزریق‌کننده، جریان ثانویه حاصل از اعمال میدان الکتریکی تقویت شده و اندازه و قدرت گردابه‌های ایجاد شده بیشتر می‌شود. از آن‌جایی‌که قابلیت تبخیر جرم تحت تاثیر جریان ثانویه حاصل از پدیده الکتروهیدرودینامیک در ولتاژهای مختلف به‌وسیله قدرت گردابه تعیین می‌شود، به همین منظور اندازه سرعت در مکان‌های مختلف در اطراف جسم مرطوب در "شکل 13" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ اعمالی قدرت گردابه‌ها و همچنین سرعت سیال به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

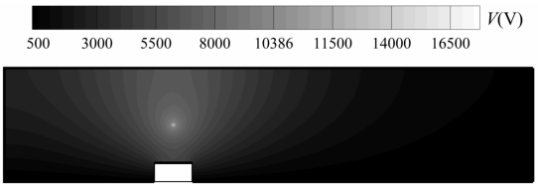


Fig. 10 Electric potential distribution, V=18 kV

شکل 10 توزیع پتانسیل الکتریکی، V=18 kV

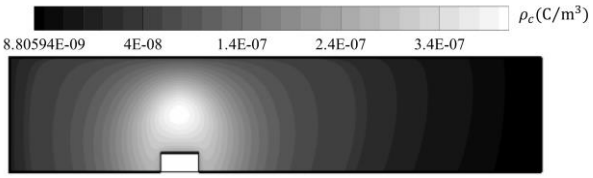
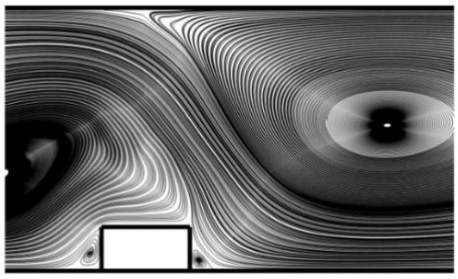


Fig. 11 Electric space charge density distribution, V=18 kV

شکل 11 توزیع چگالی بار الکتریکی، V=18 kV



(V=18 kV)

Fig. 12 Streamlines around moist object, Re=500

شکل 12 خطوط جریان اطراف جسم مرطوب، Re=500

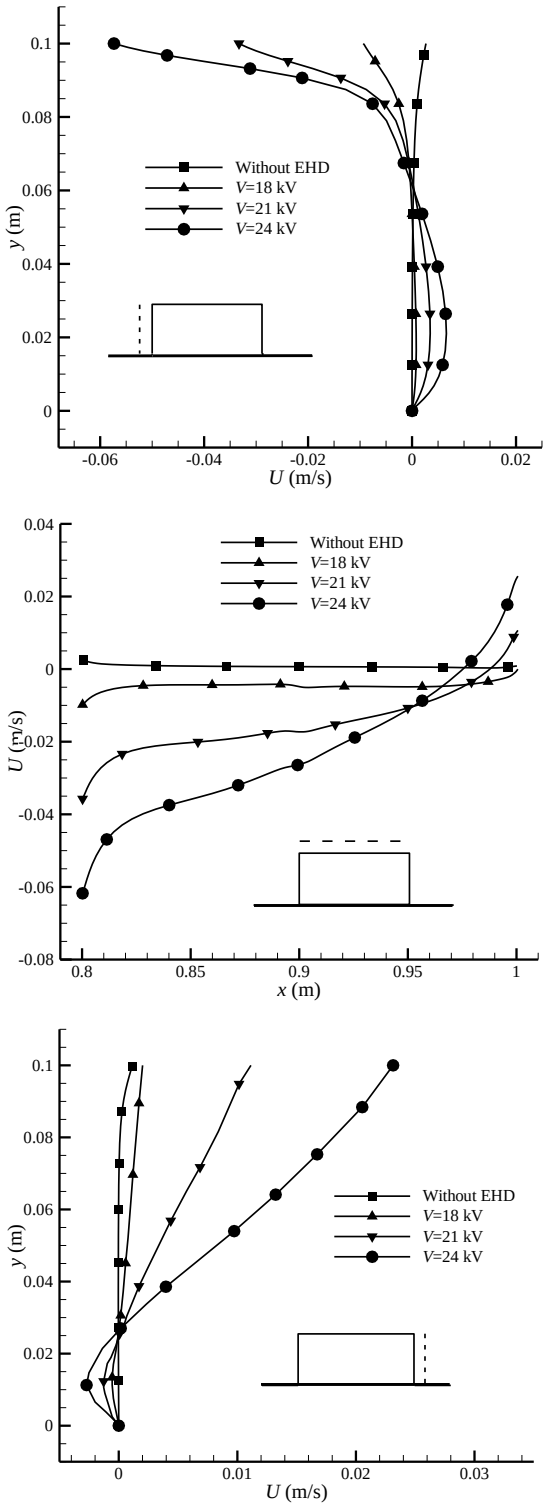


Fig. 13 Velocity profiles around the moist object at different applied voltages, Re=500

شکل 13 توزیع سرعت در اطراف جسم مرطوب در ولتاژهای اعمالی مختلف، Re=500

همچنین توزیع غلظت در اطراف جسم مرطوب برای پیکربندی حالت 3 و در ولتاژهای اعمالی 18، 21 و 24 کیلو ولت در "شکل 14" ارائه شده است. همان‌گونه که ذکر شده است با افزایش ولتاژ اعمالی سرعت سیال به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد در نتیجه گرادیان غلظت در اطراف جسم مرطوب با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد.

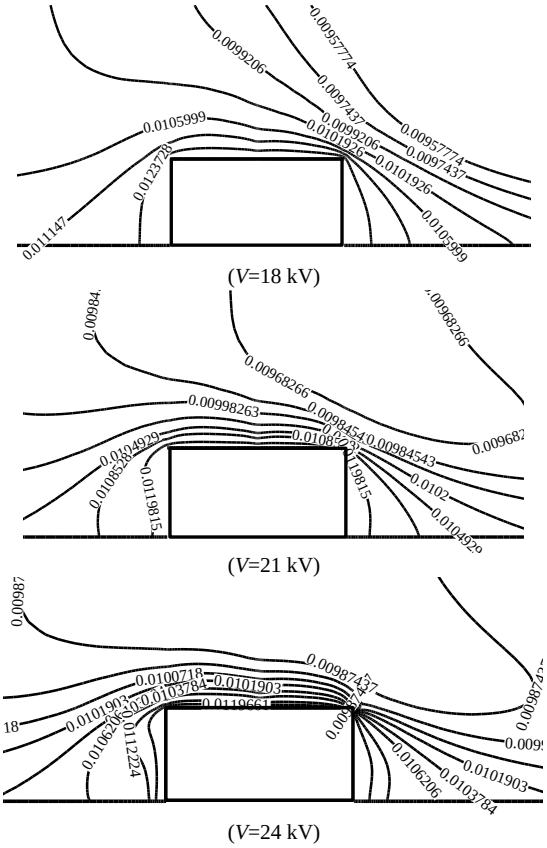


Fig. 14 Concentration distribution around the moist object at different applied voltages, Re=500

شکل 14 توزیع غلظت در اطراف جسم مرطوب در ولتاژهای اعمالی مختلف، Re=500

تاثیر ولتاژ اعمالی بر نرخ خشک‌کردن جسم متخلخل در "شکل 15" نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌دلیل افزایش مومنتم اطراف سطوح جسم متخلخل در حضور میدان الکتریکی قوی، نرخ انتقال جرم افزایش یافته است. مطابق نتایج حاضر، رطوبت جسم متخلخل پس از 14 ساعت، برای ولتاژهای اعمالی 18، 21 و 24 کیلو ولت به ترتیب 5.2، 12.2 و 16.7 درصد نسبت به عدم حضور میدان الکتریکی کاهش یافته است.

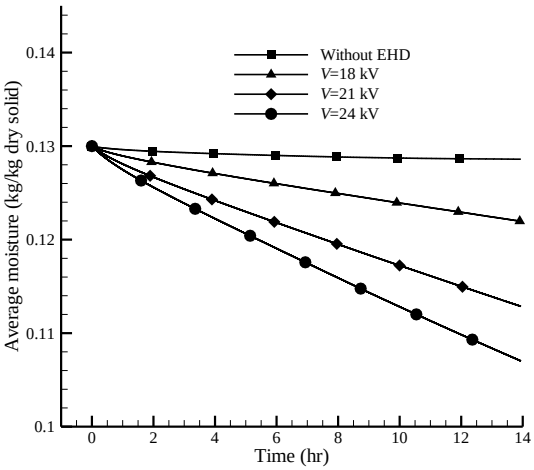


Fig. 15 Average moisture content of the moist object at different applied voltages, Re=500

شکل 15 رطوبت متوسط ماده جسم مرطوب در ولتاژهای اعمالی مختلف، Re=500

8-3- تقابل مومنتم جریان سیال ورودی با جریان ثانویه حاصل از الکتروهیدرودینامیک

نرخ خشک‌شدن یک جسم مرطوب تحت تاثیر میدان الکتریکی در اعداد رینولدز مختلف در "شکل 16" برای ولتاژ 18 کیلو ولت و متناظر با پیکربندی حالت 4 نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حضور میدان الکتریکی، نرخ خشک‌شدن جسم مرطوب در اعداد رینولدز پایین روند نزولی داشته و پس از آن با افزایش عدد رینولدز روند صعودی خواهد داشت. به‌منظور توجیه این پدیده خطوط جریان برای اعداد رینولدز مختلف در "شکل 17" ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در اعداد رینولدز پایین اثرگذاری جریان ثانویه حاصل از میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر است. بنابراین گردابه ایجاد شده حجیم‌تر و قوی‌تر بوده و موجب افزایش انتقال جرم می‌شود. با افزایش عدد رینولدز از قدرت و حجم گردابه حاصل از میدان الکتریکی کاسته شده و موجب کاهش اثرگذاری پدیده الکتروهیدرودینامیک بر بهبود نرخ انتقال جرم می‌شود. همچنین در اعداد رینولدز بسیار بالا به علت مومنتم بالای جریان سیال ورودی، یون‌های ایجاد شده توسط میدان الکتریکی شسته و در نتیجه تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک ناچیز می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود در حضور میدان الکتریکی، با کاهش عدد رینولدز نرخ خشک‌کردن بهبود یابد. البته ذکر این نکته ضروری است که اعمال میدان الکتریکی در جریان جابه‌جایی اجباری سیال در اعداد رینولدز پایین دارای تاثیر بیشتری است. اما از طرفی دیگر افزایش عدد رینولدز هم می‌تواند اثرات خشک‌کردن جابه‌جایی اجباری را بدون حضور میدان الکتریکی افزایش دهد. با توجه به اینکه بهبود انتقال جرم در حضور میدان الکتریکی بسیار بیشتر از جریان جابه‌جایی اجباری است، بنابراین در حضور میدان الکتریکی، عدد رینولدز پایین می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش نرخ انتقال جرم داشته باشد.

8-4- تاثیر موقعیت الکترود تزریق‌کننده

ضریب ζ به عنوان پارامتر افزایش انتقال جرم، به‌صورت تابعی از مکان الکترود تزریق‌کننده در ولتاژ اعمالی 18 تا 24 کیلو ولت برای پیکربندی‌های مختلف در "شکل 18" نشان داده شده است. با توجه به "شکل 18"، مشخص است که در یک عدد رینولدز معین، ضریب ζ وابستگی چشمگیری به مکان الکترود

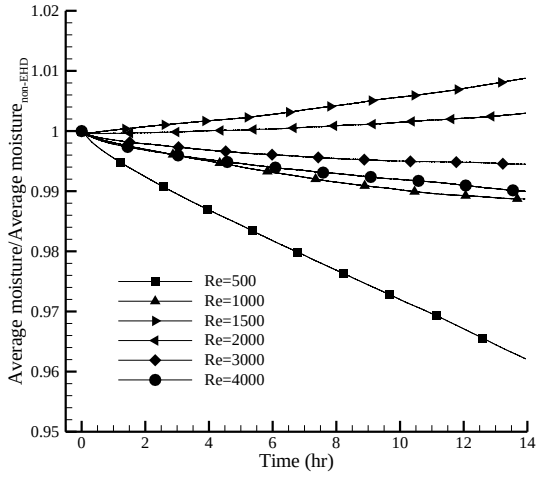


Fig. 16 Ratio of the average moisture content of the moist object at different Re numbers

شکل 16 نسبت رطوبت متوسط جسم مرطوب در اعداد رینولدز مختلف

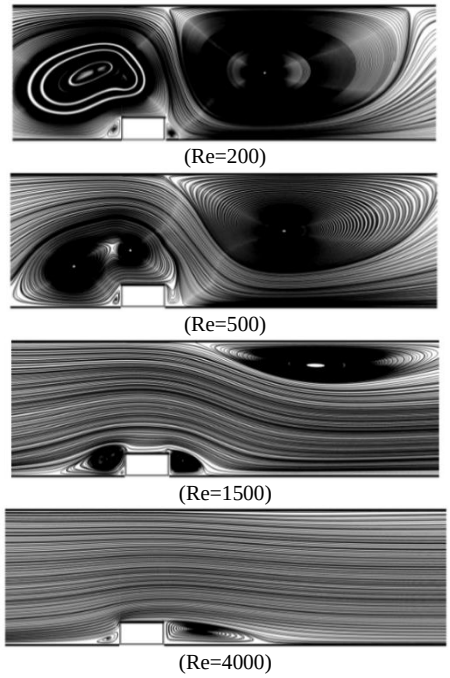


Fig. 17 Streamlines around the moist object, V=18 kV

شکل 17 خطوط جریان در اطراف جسم مرطوب، V=18 kV

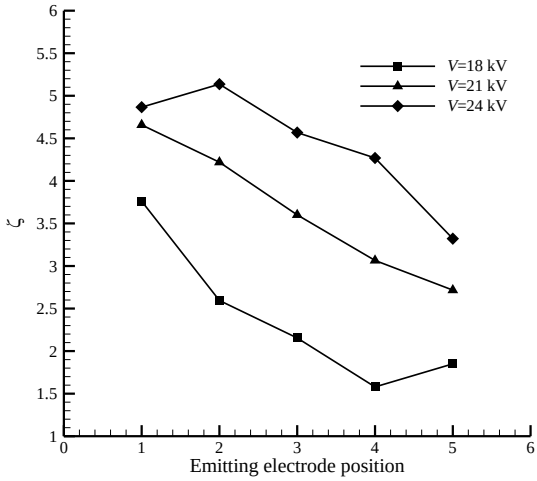


Fig. 18 The factor ζ as a function of emitting electrode position

شکل 18 ضریب ζ به عنوان تابعی از مکان الکترود تزریق‌کننده

تزریق‌کننده دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اگر الکترود تزریق‌کننده در سمت چپ جسم مرطوب قرار گرفته باشد (پیکربندی 1) بالاترین نرخ انتقال جرم حاصل می‌شود. این شرایط را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در این شرایط پدیده الکتروهیدرودینامیک باعث افزایش شتاب سیال روی سطح شده و در نتیجه گردابان غلظت روی سطح جسم مرطوب افزایش یافته و منجر به افزایش انتقال جرم می‌شود.

لازم به ذکر است که در جریان‌های با عدد رینولدز پایین با اعمال ولتاژهای قوی به علت تاثیر بالای جریان ثانویه بر جریان سیال، گردابه ایجاد شده حاصل از میدان الکتریکی بسیار حجیم و قوی خواهد بود و باعث ایجاد مانع برای جریان سیال می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود اثرگذاری مثبت پیکربندی‌هایی که الکترود تزریق‌کننده در نواحی فوقانی جسم مرطوب قرار دارند، کاهش یابد. همچنین می‌توان بیان نمود که کاهش انتقال جرم در

منحنی متناظر با ولتاژ اعمالی 24 کیلو ولت در مقایسه با ولتاژهای پایین‌تر به‌دلیل جریان ثانویه قوی و ایجاد مانع برای حرکت سیال روی جسم مرطوب می‌باشد.

9- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر نرخ خشک‌کردن جسم مرطوب به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی مطالعه میدان جریان و نرخ انتقال جرم یک جسم مرطوب تحت اثر میدان الکتریکی می‌باشد. همچنین تاثیر پارامترهایی همچون عدد رینولدز جریان سیال، ولتاژ اعمالی و موقعیت الکترود تزریق‌کننده بررسی شده است. مهمترین نتایج به‌دست آمده به‌صورت زیر می‌باشد.

- بدون حضور میدان الکتریکی، نرخ خشک کردن جسم مرطوب با افزایش عدد رینولدز بهبود می‌یابد.
- در یک عدد رینولدز مشخص، تاثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر نرخ خشک کردن با افزایش ولتاژ اعمالی بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که رطوبت جسم مرطوب پس از 14 ساعت برای ولتاژهای اعمالی 18، 21 و 24 کیلو ولت به ترتیب 5.2، 12.2 و 16.7 درصد نسبت به عدم حضور میدان الکتریکی کاهش یافته است.
- نرخ انتقال جرم از جسم مرطوب به‌طور چشمگیری به مکان الکترود تزریق کننده وابسته است. به طوری‌که در آرایشی که الکترود تزریق کننده در سمت چپ جسم مرطوب قرار گرفته است دارای بیشینه انتقال جرم می‌باشد.

10- فهرست علایم

C	غلظت (kg/m^3)
C_p	گرمای ویژه (J/kg K)
$C_\mu, C_{2\varepsilon}, C_{1\varepsilon}$	ثابت مدل کی- اپسیلون
D	ضریب پخش سیال (m^2/s)
D_m	ضریب پخش هم‌دما (m^2/s)
D_t	ضریب پخش غیر هم‌دما ($m^2/K\ s$)
E	شدت میدان الکتریکی (V/m)
E_0	مقدار پیک (V/m)
F_e	نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیک (N/m^3)
h	ضریب انتقال جرم (m/s)
J	چگالی جریان الکتریکی (A/m)
k	انرژی جنبشی آشفتگی (W/m K)
K	ضریب هدایت حرارتی (J)
M	مقدار رطوبت (kg/kg dry solid)
n	راستای عمود بر سطح
Pr	عدد پرانتل
r	شعاع الکترود تزریق کننده (m)
Sc	عدد اشمیت
Sh	عدد شروود
t	زمان (s)
T	دما (K)
u	مولفه سرعت (m/s)
u^*	سرعت اصطکاکی (m/s)
V	پتانسیل الکتریکی (V)
x, y	مختصات

علایم یونانی

β	یون‌پذیری ($m^2/V\ s$)
ε	نرخ پراکندگی انرژی جنبشی (W)
ε	ضریب گذردهی الکتریکی (F/m)
μ	لزجت دینامیکی (kg/m s)
θ	زاویه بین خط عمودی و خط واصل از الکترود تزریق‌کننده به صفحه (Degree)
ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
ρ_c	چگالی بار الکتریکی (C/m^3)
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	ثابت مدل کی- اپسیلون
κ	ثابت کارمن
τ	تنش برشی (N/m^2)

زیرنویس‌ها

e	الکتریکی
f	سیال
i, j	1,2 اشاره به x, y
in	ورودی
l	مایع
p	جسم متخلخل
s	سطح جسم متخلخل
t	آشفته
v	بخار

11- مراجع

[1] M. Yang, C. Ding, Electrohydrodynamic (EHD) drying of the Chinese wolfberry fruits, *SpringerPlus*, Vol. 5, No. 1, pp. 909, 2016.

[2] S. O. Ahmedou, O. Rouaud, Assessment of the electrohydrodynamic drying process, *Food and Bioprocess Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 240-247, 2009.

[3] S. N. Ayottaya, C. Chaktranond, P. Rattanadecho, Numerical analysis of electric force influence on heat transfer in a channel flow (theory based on saturated porous medium approach), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, No. 1, pp. 361-374, 2013.

[4] S. O. Ahmedou, M. Havet, Effect of process parameters on the EHD airflow, *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 2-3, pp. 222-227, 2009.

[5] H. Mohaddes Deylami, N. Amanifard, F. Dolati, R. Kouhikamali, K. Mostajiri Abid, 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.

[6] M. Mostajiri Abid, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical investigation of flow and temperature field on the backwardfacing step affected by Electrohydrodynamic actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 231-238, 2015. (in Persian فارسی)

[7] N. N. Barthakur, Electrohydrodynamic enhancement of evaporation from NaCl solutions, *Desalination*, Vol. 78, No. 3, pp. 455-465, 1990.

[8] Y. Chen, N. N. Barthakur, Electrohydrodynamic (EHD) Drying of Potato slabs, *Journal of Food Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 107-119, 1994.

[9] W. Coa, Y. Nishiyama, S. Koide, Electrohydrodynamic drying characteristics of wheat using high voltage electrostatic field, *Journal of Food Engineering*, Vol. 62, No. 3, pp. 209-213, 2004.

[10] F. Li, L. Li, J. Sun, E. Tatsumi, Effect of electrohydrodynamic (EHD) technique on drying process and appearance of okara cake, *Journal of Food Engineering*, Vol. 77, No. 2, pp. 275-280, 2006.

[11] J. Y. Liu, Drying of porous materials in a medium with variable potentials. *Journal of heat transfer*, Vol. 103, No. 3, pp. 757-762, 1991.

[12] M. Eswaramurthi, P. Kandaswamy, Transient double-diffusive convection of water around 4° C in a porous cavity, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, No. 5, pp. 1-7, 2009.

[13] O. D. Makinde, P. Sibanda, Magnetohydrodynamic mixed-convective flow and heat and mass transfer past a vertical plate in a porous medium with constant wall suction. *Journal of Heat transfer*, Vol. 130, No. 11, pp. 1-8, 2008.

[14] N. Amanifard, A. Khodaparast Haghi, A numerical study on drying of porous media, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 191-198, 2008.

[15] A. Dinani, M. Havet, Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices, *Industrial Crops and Products*, Vol. 70, No. 1, pp. 417-426, 2015.

[16] G. 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, 2015. (in Persian فارسی)

[17] G. Heidarinejad, R. Babaei, Nmerical 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.

[18] 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.

[19] S. S. Hoseininezhad, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, F. Dolati, Numerical study of flow characteristics around a NACA 4412 asymmetric airfoil under the influence of electric field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 147-154, 2014. (in Persian فارسی)

[20] J. H. Davidson, E. J. Shaughnessy, Turbulence generation by electric body forces, *Experiments in fluids*, Vol. 4, No. 1, pp. 17-26, 1986.

[21] ANSYS, ANSYS Fluent/Mechanical 12.0 User's Guide & Theory Guide, *ANSYS Inc*, 2009.

[22] S. L. Zhao, K. Adamiak, EHD flow in air produced by electric corona discharge in pin–plate configuration, *Journal of Electrostatics*, Vol. 63, No. 3-4, pp. 337-350, 2005.

[23] K. Murugesan, H. N. Suresh, K. N. Seetharamu, P. A. A. Narayana, T. Sundararajan, A theoretical model of brick drying as a conjugate problem, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 21, pp. 4075-4086, 2001.

[24] N. Oussalah, Y. Zebboudj, Finite-element analysis of positive and negative corona discharge in wire-to-plane system, *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 34, No. 3, pp. 215-223, 2006.