



بررسی تأثیر باد کرونا بر انتقال جرم و مصرف انرژی در فرآیند خشک کردن جسم مرطوب

فرید دولتی^۱، نیما امانی فرد^۱، حامد محدث دیلمی^۲، خشایار یزدانی^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
^۲دانشکده فنی و مهندسی شرق گیلان، دانشگاه گیلان، رودسر، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ اسفند ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۶ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۳ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

انتقال جرم
باد کرونا
جسم متخلخل
مصرف انرژی ویژه

چکیده: در مقاله حاضر، خشک کردن یک جسم مرطوب در حضور و بدون حضور میدان الکتریکی به صورت عددی مورد مطالعه 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. در این مطالعه، تأثیر پارامترهای مؤثر از قبیل ولتاژ اعمالی و آرایش الکترود تزریق کننده بر نرخ خشک کردن و همچنین مصرف انرژی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور میدان الکتریکی، با افزایش ولتاژ اعمالی از ۱۸ کیلو ولت به ۲۴ کیلو ولت رطوبت خروجی از جسم متخلخل ۳/۷۸ برابر و توان مصرفی پدیده الکترو هیدرودینامیک ۷/۹۶ برابر افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شده که نرخ خشک کردن با کاهش فاصله بین الکترود تزریق کننده و جمع کننده افزایش می‌یابد. مطابق نتایج عددی، افزایش انتقال جرم معمولاً با افزایش مصرف انرژی همراه می‌باشد؛ بنابراین مصرف انرژی ویژه به عنوان معیار نهایی مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. قابل مشاهده می‌باشد که مقدار مصرف انرژی ویژه فرآیند خشک کردن با تغییر آرایش الکترود تزریق کننده به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار گرفته است. در پایان نیز یک آرایش بهینه به عنوان آرایش مقرون به صرفه معرفی شده است.

۱- مقدمه

می‌شود که شامل یون‌های مثبت و منفی حاصل از یونیزاسیون است. در خارج از این منطقه یون‌های همنام با الکترود تزریق کننده، تحت اثر نیروی حجمی حاصل از میدان الکتریکی به صورت توده‌ای به طرف الکترود جمع کننده^۵ حرکت می‌کنند. این یون‌ها در طول حرکت بخشی از مومنت خود را در اثر برخورد و یا تنش برشی ناشی از اتلاف ویسکوزیته (اختلاف سرعت بین ذرات باردار و بی‌بار) به مولکول‌های خنثی انتقال داده و موجب هدایت آنها به سمت الکترود جمع کننده می‌شوند و در نتیجه جریانی با نام باد کرونا ایجاد می‌شود [۲].

روش الکترو هیدرودینامیک به دلیل نداشتن ارتعاش و سر و صدا، مصرف کم و کنترل سریع جریان از روش‌های پرکاربرد به‌شمار می‌رود. آیوتا و همکاران [۳]، تأثیر آرایش‌های مختلف الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده را بر توزیع میدان الکتریکی و میدان جریان به صورت عددی تحلیل نمودند. 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. دیلمی و همکاران [۴] انتقال حرارت در یک کانال مسطح را در حضور محرک الکترو هیدرودینامیک به صورت عددی مورد بررسی قرار

روش‌های مرسوم خشک کردن که بر مبنای حرارت صورت می‌گیرند، علاوه بر طولانی بودن فرآیند خشک کردن و بازدهی پایین، معمولاً موجب تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی در حین انجام فرآیند می‌شوند [۱]. استفاده از پدیده الکترو هیدرودینامیک^۱ به عنوان یک روش فعال در فرآیند خشک کردن اجسام مرطوب، یکی از مهمترین روش‌های غیر حرارتی است که اخیراً مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش تحت تأثیر میدان الکتریکی حاصل از زوج الکترود متصل به منبع تغذیه ولتاژ بالا، مولکول‌های سیال دی‌الکتریک^۲ ساکن و یا در حال حرکت تشکیل دوقطبی الکتریکی می‌دهند. این دوقطبی‌ها در نقاط با شعاع انحنای کوچک الکترود تزریق کننده^۳ که دارای گرادیان‌های شدید میدان الکتریکی است، تجزیه شده که به این پدیده تخلیه کرونا^۴ گفته می‌شود. در اثر این پدیده، ناحیه‌ای کوچک در اطراف الکترود تزریق کننده به نام منطقه یونیزاسیون تشکیل

¹Electrohydrodynamics

²Dielectric

³Emitting electrode

⁴Corona discharge

⁵Collector electrode

دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک با افزایش ولتاژ اعمالی و کاهش شعاع الکتروود تزریق کننده، در اعداد رینولدز پایین تر بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می شود. همچنین انتخاب آرایش مناسب الکتروودها و فاصله بهینه مابین آنها، تأثیر قابل توجهی بر افزایش انتقال حرارت دارد. حیدری نژاد و بابایی [۵] به صورت عددی تأثیر میدان الکتریکی بر میدان جریان و افزایش نرخ تبخیر آب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان می دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی نرخ تبخیر افزایش می یابد، اما در یک ولتاژ ثابت با افزایش عدد رینولدز، نرخ تبخیر ابتدا روند صعودی داشته و پس از آن به دلیل کاهش اندازه گردابه ها روند نزولی دارد. پنگ و همکاران [۶] بهبود انتقال حرارت در یک کانال مستطیلی تحت محرک الکتروهیدرودینامیک را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها تأثیر مکان طولی برای حالت تک الکتروود تزریق کننده و آرایش طولی برای چندین الکتروود تزریق کننده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها حاکی از آن است که با نزدیک شدن تک الکتروود تزریق کننده به سمت ورودی کانال، ضریب انتقال حرارت به بیشینه مقدار خود می رسد. همچنین دریافتند که افزایش تعداد الکتروود تزریق کننده موجب افزایش مصرف انرژی می شود؛ اما الزاماً موجب بهبود انتقال حرارت نخواهد شد.

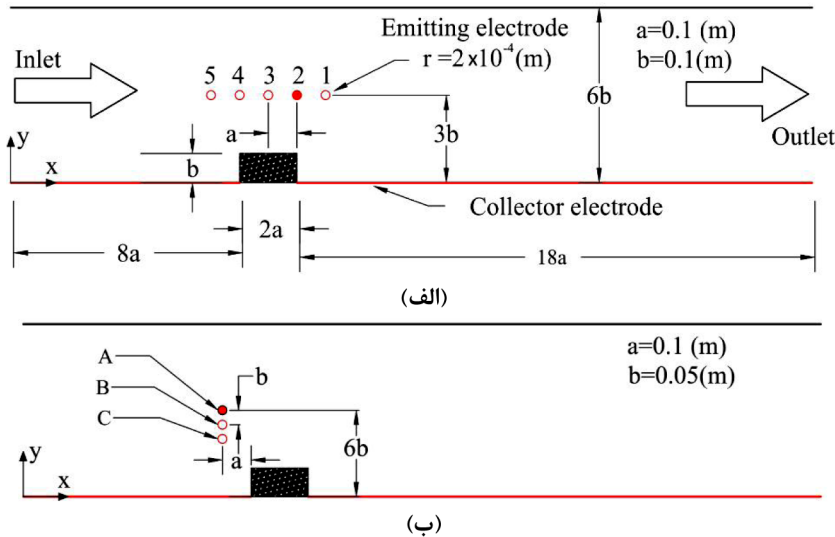
چن و بارتاکور [۷] خشک شدن تکه های سیب زمینی را تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که نرخ خشک شدن برای ضخامت های ۲ و ۴ میلی متری ۲/۵ برابر و برای ضخامت ۸ میلی متری تا ۲/۱ برابر افزایش می یابد. همچنین آنها دریافتند که استفاده از میدان الکتریکی قوی اثر نامطلوبی روی کیفیت محصولات تولید شده ندارد. امانی فرد و حقی [۸] به صورت عددی خشک شدن جابه جایی 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 ۵۰ تا ۱۰۰۰ دریافتند که نرخ خشک کردن با ضریب ۱/۴ و ۱/۵ رابطه دارد. دالوند و همکاران [۹] تأثیر جریان کرونا بر سرعت خشک کردن کیوی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق تأثیر ولتاژ اعمالی و تعداد الکتروود تزریق کننده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها حاکی از آن است که سرعت خشک کردن کیوی با افزایش تعداد الکتروودها، کاهش می یابد. دینانی و هاوت [۱۰] به صورت تجربی با استفاده از روش ترکیبی جابه جایی اجباری و میدان الکتریکی قوی، خشک شدن تکه های قارچ را مطالعه نمودند. آنها دریافتند که در سرعت های پایین، با افزایش ولتاژ نرخ خشک شدن افزایش می یابد. همچنین نشان دادند که در سرعت های بالا به دلیل تداخل جریان اصلی سیال با جریان کرونا نرخ خشک شدن کاهش می یابد. مارتینکو و ژینگ [۱۱] خشک کردن تکه های سیب را با استفاده از روش ترکیبی جابه جایی اجباری و میدان الکتریکی بررسی کردند. آنها تأثیر دو پارامتر ولتاژ و سرعت جریان سیال را بر سرعت خشک کردن و مصرف انرژی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در حضور میدان الکتریکی، سرعت خشک کردن در سرعت های ۵ و ۱ متر بر ثانیه،

به ترتیب ۱/۵ تا ۴ برابر افزایش می یابد. همچنین نشان دادند که میدان الکتریکی در سرعت های پایین، دارای تأثیر بیشتری بر خشک کردن است. علاوه بر این آنها دریافتند که استفاده از میدان الکتریکی مصرف انرژی را در مقایسه با روش های سنتی رایج به طور چشمگیری کاهش می دهد. یانگ و دینگ [۱۲] روش خشک کردن الکتروهیدرودینامیک را برای خشک کردن وولفبری^۱ چینی به کار گرفتند. آنها در این مطالعه تجربی، از الکتروود سوزنی-صفحه ای در ولتاژهای مختلف و الکتروود سوزنی-صفحه ای چندگانه در ولتاژ ۲۸ کیلوولت استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در مدت ۵ ساعت، سرعت خشک کردن در ولتاژ ۲۰ و ۲۴ و ۲۸ و ۳۲ کیلوولت، به ترتیب ۱/۸۸ و ۲/۰۱ و ۲/۳۷ و ۲/۶۶ برابر افزایش می یابد. همچنین نتایج آنها نشان داد که با افزایش ولتاژ اعمالی، نرخ خشک کردن افزایش می یابد. دولتی و همکاران [۱۳] به صورت عددی تأثیر میدان الکتریکی بر میزان خشک کردن یک جسم مرطوب را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که بدون اعمال میدان الکتریکی، با افزایش عدد رینولدز نرخ خشک کردن جسم مرطوب افزایش می یابد. همچنین در حضور میدان الکتریکی با ثابت ماندن عدد رینولدز، با افزایش ولتاژ اعمالی تأثیر پدیده الکتروهیدرودینامیک بر نرخ خشک کردن افزایش می یابد. در این مطالعه تنها تأثیر میدان الکتریکی در آرایش افقی الکتروود تزریق کننده بر انتقال جرم مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات محققان نشان می دهد که جریان ثانویه حاصل از پدیده الکتروهیدرودینامیک، تأثیر قابل توجهی بر جریان اولیه حاکم و انتقال حرارت و جرم دارد. بر این اساس می توان دریافت که عملکرد تخلیه کرونا در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش نرخ فرآیند خشک کردن محسوس می باشد. در مطالعه دولتی و همکاران [۱۳] تأثیر مکان الکتروود تزریق کننده فقط در راستای افقی مورد بررسی قرار گرفته است بنابراین نیاز است که اثر جابه جایی الکتروود تزریق کننده در راستای عمودی نیز مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این آرایش بهینه از منظر مصرف انرژی ویژه نیز معرفی شود. با توجه به موارد ذکر شده، اهداف و نوآوری مطالعه حاضر به شرح زیر می باشد:

- اکثر مطالعات انجام شده به منظور خشک کردن مواد مرطوب تحت تأثیر محرک الکتروهیدرودینامیک به صورت آزمایشگاهی انجام شده است؛ بنابراین در مطالعه حاضر از تحلیل عددی به منظور مطالعه پارامترهای مختلف و بررسی اثر گذاری آنها استفاده شده است.
- تأثیر مکان قرارگیری الکتروود تزریق کننده بر انتقال جرم به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است.
- مقدار مصرف انرژی ویژه به عنوان یک معیار اقتصادی، در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.
- در اکثر مطالعات انجام شده دمای ورودی سیال بیشتر از دمای جسم مرطوب بوده و انتقال جرم در اثر انتقال حرارت صورت می گیرد اما در کار حاضر انتقال جرم به صورت غیر حرارتی^۲ صورت می گیرد.

^۱Wolfberry

^۲Non-thermal



شکل ۱: (الف) آرایش‌های افقی الکترود تزریق‌کننده (ب) آرایش‌های عمودی الکترود تزریق‌کننده

Fig. 1. Schematic view of the computational domain, (a) horizontal arrangements of emitting electrode; (b) vertical arrangements of emitting electrode.

الکتریکی هوا را می‌توان ثابت فرض کرد. بنابراین عبارات دوم و سوم در رابطه (۱) ناچیز بوده و تنها نیروی کولمب به‌عنوان نیروی ناشی از اعمال میدان الکتریکی بر جریان سیال تأثیر می‌گذارد [۱۵].

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 استفاده می‌شود [۱۶].

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

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

که در رابطه (۳)، چگالی جریان الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_{ei} = \rho_c \beta_e E_i + \rho_c u_i + \sigma_e E_i \quad (4)$$

که در این رابطه، β_e یون‌پذیری و σ_e هدایت الکتریکی است. شدت میدان الکتریکی از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

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

سه عبارت سمت راست رابطه (۴) به ترتیب تحرک یونی، جابه‌جایی الکتریکی و هدایت الکتریکی نامیده می‌شوند که در آن، عبارت مربوط به هدایت الکتریکی عموماً در گازها بسیار کوچک می‌باشد و قابل صرف‌نظر کردن است. علاوه بر این، جمله جابه‌جایی الکتریکی ناشی از سرعت مشخصه سیال باعث تأثیر متقابل میدان‌های الکتریکی و جریان بر یکدیگر می‌گردد [۱۷]. در تخلیه کرونا، میدان‌های الکتریکی، جریان و دما بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. به طوری که باد کرونای تولید شده توسط میدان الکتریکی الگوی جریان را تغییر می‌دهد و از طرف دیگر سرعت جریان سیال بر توزیع

۲- هندسه مسأله

شماتیکی از هندسه دو بعدی مسأله مورد نظر، برای آرایش‌های افقی و عمودی الکترود تزریق‌کننده در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌منظور یافتن بیشینه نرخ انتقال جرم از جسم مرطوب، الکترود تزریق‌کننده در ۵ مکان افقی مختلف و ۳ مکان عمودی مختلف قرار داده شده است. لازم به‌ذکر است که خواص فیزیکی هوا به‌عنوان سیال عامل و آجر به‌عنوان جسم مرطوب مطابق با مرجع [۸] انتخاب شده است.

۳- معادلات حاکم

۳-۱- معادلات میدان الکتریکی

نیروی حجمی اعمال شده توسط میدان الکتریکی بر میدان جریان به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

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

در این رابطه ϵ_e ضریب گذردهی الکتریکی است. همچنین عبارت اول در رابطه فوق نیروی کولمب^۱ حاصل از اعمال میدان الکتریکی بر الکترون‌ها و یون‌ها را ارائه می‌کند. عبارت دوم نیروی دی‌الکتروفوریتیک^۲ تولید شده در اثر گرادیان ضریب گذردهی الکتریکی می‌باشد. عبارت سوم با نام نیروی الکترواسترکتیو^۳ به دلیل توزیع غیریکنواخت میدان الکتریکی و تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی با دما و چگالی به وجود می‌آید. برای ایجاد تخلیه کرونا در سیال هوا با شرایط فشار اتمسفر و دمای اتاق، ضریب گذردهی

¹Coulomb force

²Dielectrophoretic force

³Electrostrictive force

• غلظت:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (c_p C) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (c_p u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D + \frac{\mu_t c_p}{Sc_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

همان‌گونه که در رابطه (۸) مشخص می‌باشد، عبارت آخر معادلات ناویر-استوکس نیروی کولمب حاصل از اعمال میدان الکتریکی بر جریان سیال است که از حل معادلات میدان الکتریکی تعیین می‌گردد.

در روابط (۸) تا (۱۰)، μ لزجت دینامیکی، K ضریب هدایت، c_p ظرفیت گرمایی ویژه، Pr_t پرانتل آشفتگی، D ضریب نفوذ و Sc_t عدد اشمیت آشفتگی است. همچنین در این معادلات μ_t لزجت آشفتگی می‌باشد که در مدل کی-اِپسیلون استاندارد به صورت زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، k انرژی جنبشی آشفتگی و ε نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی می‌باشند که با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) به‌دست می‌آیند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (13)$$

همچنین اعداد ثابت معادلات کی-اِپسیلون استاندارد به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴]:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (14)$$

۳-۳ معادلات جسم مرطوب

معادلات بقای رطوبت و انرژی برای جسم مرطوب که از قانون فیک و قانون دارسی به دست آمده است، عبارتند از [۸]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (D_{ii} + D_{nn}) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + (D_{mi} + D_{mv}) \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

میدان الکتریکی مؤثر می‌باشد. اما در گازها یون‌ها با سرعتی که عموماً نسبت به سرعت توده‌ای سیال بسیار بالاتر است، حرکت می‌کنند؛ بنابراین اثر جریان توده‌ای سیال بر میدان الکتریکی ناچیز می‌باشد و در نتیجه با تقریب مناسبی می‌توان از جمله جابه‌جایی صرف‌نظر نمود [۱۷].

با اعمال فرضیات فوق و ترکیب روابط (۳) و (۴) و (۵)، قانون بقای جریان الکتریکی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (-\rho_c \beta_e \nabla V) = 0 \quad (6)$$

روابط (۱) و (۵) و (۶) معادلات اساسی حاکم بر میدان الکتریکی می‌باشند که به‌منظور تعیین نیروی کولمب به‌طور همزمان حل می‌شوند.

۳-۲ معادلات میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل پیوستگی، مومنتم، بقای انرژی و غلظت می‌باشند. از آنجایی که جریان ثانویه ایجاد شده توسط محرک الکتروهیدرودینامیک به صورت موضعی آشفته است، بنابراین نیاز است که جریان سیال به صورت آشفته مدل‌سازی شود [۱۸]. در این مطالعه، جهت مدل‌سازی جریان آشفته، مدل آشفتگی دو معادله‌ای کی-اِپسیلون 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 دو بعدی و تراکم ناپذیر بیان شده است.

• پیوستگی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (7)$$

• مومنتم:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) + F_{ei} \quad (8)$$

در حالی که:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

• انرژی:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

جدول ۱: شرایط مرزی

Table 1. Boundary conditions.

مرز	دما	غلظت	سرعت	پتانسیل الکتریکی	چگالی بار الکتریکی
ورودی کانال	$T = T_0$	$C = C_0$	$u = u_0$	$\partial V / \partial x = 0$	$\partial \rho_c / \partial x = 0$
خروجی کانال	$\partial T / \partial x = 0$	$\partial C / \partial x = 0$	$\partial u / \partial x = 0$	$\partial V / \partial x = 0$	$\partial \rho_c / \partial x = 0$
الکتروود تزریق کننده	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial C / \partial n = 0$	$u = 0$	$V = 0$	قانون پیک
دیواره پایین	$\partial T / \partial y = 0$	$\partial C / \partial y = 0$	$u = 0$	$\partial V / \partial y = 0$	$\partial \rho_c / \partial y = 0$
دیواره بالا	$\partial T / \partial y = 0$	$\partial C / \partial y = 0$	$u = 0$	$\partial V / \partial y = 0$	$\partial \rho_c / \partial y = 0$
مرز جسم جامد با سیال	رابطه (۲۳)	رابطه (۲۴)	$u = 0$	$\partial V / \partial n = 0$	$\partial \rho_c / \partial n = 0$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (۱۸)$$

که در آن τ_w تنش برشی دیواره و از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است.

$$\tau_w = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_w \quad (۱۹)$$

شرایط مرزی برای کی و اپسیلون در ورودی کانال از رابطه (۲۰) استفاده می شود.

$$k = \frac{3}{2} (0.16 \text{Re}^{-1/8} U)^2 \quad (۲۰)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.07 D_h}$$

شرایط مرزی در مرز جامد با هوا مطابق رابطه زیر می باشد [۸]:

• پیوستگی دما:

$$T_f = T_s \quad (۲۱)$$

غلظت سیال در فصل مشترک جسم جامد و سیال، تابعی از دما و رطوبت می باشد. رطوبت نسبی از رابطه (۲۲) به دست می آید [۱۹].

$$\phi = 1 - \exp(-17M^{-0.6}) \quad (۲۲)$$

رابطه (۲۲)، رابطه دفع همدمای اصلاح شده هندرسون^۱ می باشد. این رابطه به منظور تعیین رطوبت نسبی موضعی در سطح مشترک جسم مرطوب و هوا استفاده می شود. همچنین غلظت سیال با توجه به روابط ترمودینامیکی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$(c_0 + m_l c_l + m_v c_v) \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{k}{\rho_0} + h_{fg} D_{lv} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + h_{fg} D_{mv} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (۱۶)$$

در معادلات D_l ضریب پخش غیرهمدما، D_m ضریب پخش هم دما، C ظرفیت گرمایی جسم جامد، k ضریب هدایت حرارتی جسم جامد، ρ_0 چگالی جسم جامد خشک و h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب است.

۳-۴- شرایط مرزی

هوا با سرعت یکنواخت، دما و رطوبت مشخص در ورودی کانال در نظر گرفته شده است. شرط توسعه یافتگی برای تمامی متغیرهای مسأله در مرز خروجی در نظر گرفته شده است. دیواره های بالا و پایین به صورت آدیاباتیک و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می باشند. شرایط مرزی دما، غلظت، سرعت، پتانسیل الکتریکی و چگالی بار الکتریکی در جدول ۱ ارائه شده است.

برای محاسبه انرژی جنبشی (k) آشفتگی و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی (ε) در نزدیکی دیواره های جامد از رابطه (۱۷) استفاده شده است.

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{c_\mu} f_\mu}, \varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa y} \quad (۱۷)$$

که u^* سرعت اصطکاکی است و از رابطه (۱۸) به دست می آید.

¹Henderson's modified desorption equation

صریح و پایا، حل می‌شوند. سپس معادلات جریان سیال در حالت ناپایا و توسط حل کننده بر پایه فشار به صورت ضمنی شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی‌های پژوهش حاضر نیز ضرایب زیر تخفیف به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که همگرایی بهتری برای حل معادلات به‌دست آید. مقدار ضرایب زیرتخفیف برای معادلات فشار، مومنتم، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی (ϵ) به ترتیب برابر $0/2$ و $0/5$ و $0/5$ و $0/5$ انتخاب گردید. اگرچه به ظاهر ممکن است که مقدار این ضرایب باعث تأخیر همگرایی می‌شود؛ اما پایداری حل را افزایش می‌دهد.

به منظور درک بهتر روند حل عددی، الگوریتم مراحل حل معادلات حاکم در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که کلیه محاسبات با استفاده از پردازشگر هفت هسته‌ای ۳/۹ گیگاهرتز اینتل انجام شده و زمان محاسباتی حدود ۲ الی ۴ ساعت برای حل معادلات جریان الکتریکی و حدود ۲۰ الی ۲۵ ساعت برای حل معادلات جریان سیال و ماده مرطوب می‌باشد.

۵- شبکه محاسباتی و استقلال از شبکه

شبکه‌بندی ناحیه محاسباتی به صورت سازمان‌یافته، غیریکنواخت و مستطیلی ایجاد شده و همچنین در نواحی که گرادیان‌های شدید مورد انتظار است از تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی استفاده شده است. به عنوان مثال، پارامترهای میدان الکتریکی در اطراف الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده و تغییرات دما و سرعت در نزدیکی دیواره‌ها دارای گرادیان‌های شدید می‌باشند و به همین دلیل، همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تراکم شبکه‌بندی در این نواحی نسبت به دیگر نواحی بیشتر می‌باشد. ضمناً ناحیه محاسباتی به نواحی مختلفی تقسیم‌بندی شده است تا کنترل بهتری بر روی شبکه تولیدی صورت گیرد. به‌منظور بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی، مقدار رطوبت جسم مرطوب در لبه حمله به عنوان پارامتر بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی انتخاب شده است. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای مطالعه استقلال از شبکه از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۲۰۰ استفاده شده است. با توجه به شکل ۴ واضح است که با تغییر تعداد شبکه از 280×140 به 300×150 تفاوت اندکی در جواب‌ها مشاهده می‌شود، بنابراین شبکه با تعداد 280×140 به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است.

۶- تحلیل داده‌ها

توان مصرفی در سازوکارهای افزایش انتقال حرارت یکی از عوامل مهم است که به سبب مطرح شدن بحث اقتصادی، مانعی برای افزایش انتقال حرارت و جرم به اندازه دلخواه است. در حالت کلی، توان مصرفی به پارامترهای زیادی مانند ولتاژ اعمالی، مکان الکترودها و فاصله الکترودهای تزریق کننده و جمع کننده وابسته است. توان مصرفی محرک الکتروهیدرودینامیک از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$C = \frac{2.167 \times \phi \times P_g}{T} \quad (22)$$

• تعادل شار حرارتی:

$$\left(k_p + \rho_0 h_{fg} D_{iv} \right) \frac{\partial T}{\partial n} + \rho_0 h_{fg} D_{mv} \frac{\partial M}{\partial n} = K \frac{\partial T_f}{\partial n} + h_{fg} D \frac{\partial C}{\partial n} \quad (23)$$

• تعادل شار اجزاء:

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

تعیین شرط مرزی چگالی بار الکتریکی بر روی الکترودهای تزریق کننده به‌طور مستقیم قابل محاسبه نیست و با سعی و خطا به‌دست می‌آید. در این مطالعه از فرضیه کاپتروف^۱ و قانون پیک به منظور تعیین چگالی بار الکتریکی استفاده شده است. فرضیه کاپتروف بیان می‌کند که بعد از شروع تخلیه کرونا، میدان الکتریکی با افزایش ولتاژ ثابت می‌ماند. براساس این فرضیه، چگالی بار الکتریکی بر روی الکترودهای تزریق کننده حدس زده می‌شود و میدان الکتریکی محاسبه و سپس با عدد پیک محاسبه شده از رابطه (۲۵) مقایسه می‌شود. این روند سعی و خطا تا زمان برابر شدن میدان الکتریکی بدست آمده از حل عددی و مقدار حاصل از رابطه پیک^۲ ادامه می‌یابد [۱۵].

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

در رابطه فوق r شعاع الکترودهای تزریق کننده برحسب سانتی‌متر است. لازم به‌ذکر است که شرط مرزی خروجی برای فشار، فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است.

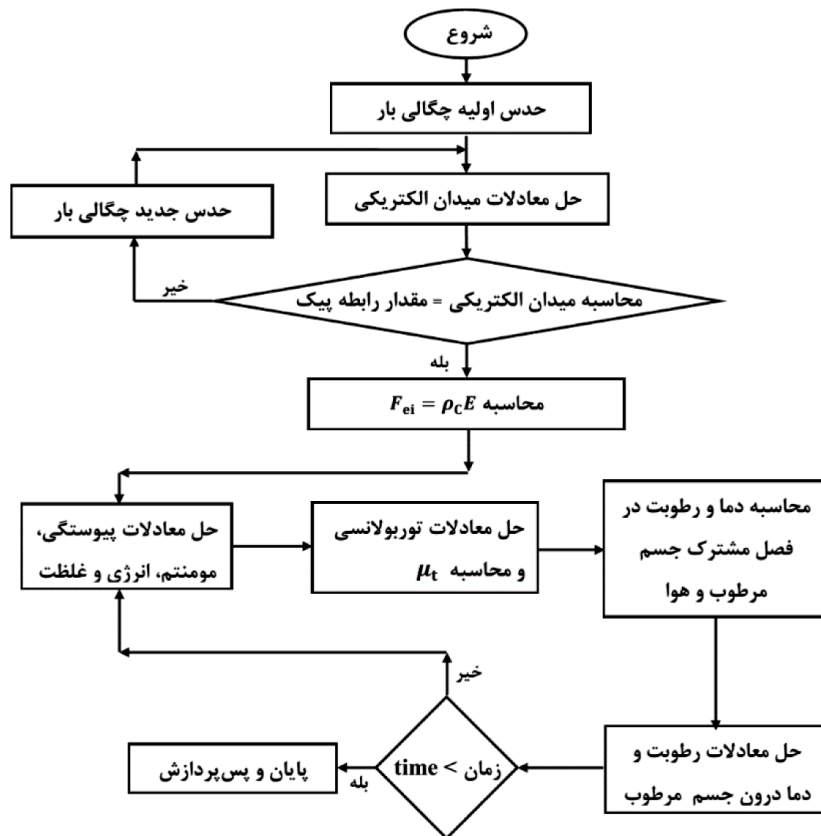
۴- روند حل عددی

در این مطالعه، به‌منظور حل عددی معادلات حاکم، از زبان برنامه‌نویسی فرترن ۹۵ استفاده شده و روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات حاکم در نظر گرفته شده است. از الگوریتم سیمپل^۳ برای حل معادلات میدان سیال استفاده شده است همچنین برای جلوگیری از انتشار خطای عددی، جملات جابه‌جایی و نفوذ در این معادلات به روش پیوندی گسسته‌سازی شده‌اند. برای گسسته‌سازی عبارت جابه‌جایی در معادله بقای چگالی الکتریکی از روش بالادست جریان مرتبه اول استفاده شده است. روند حل عددی به این صورت است که ابتدا معادلات میدان الکتریکی به روش

^۱Kaptsov theory

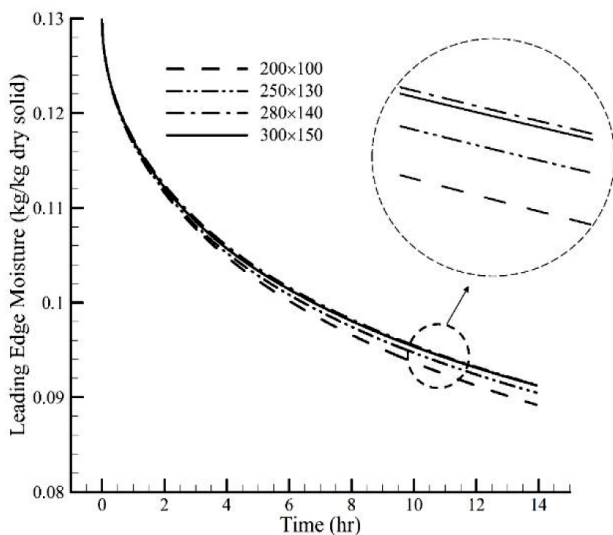
^۲peek

^۳SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)



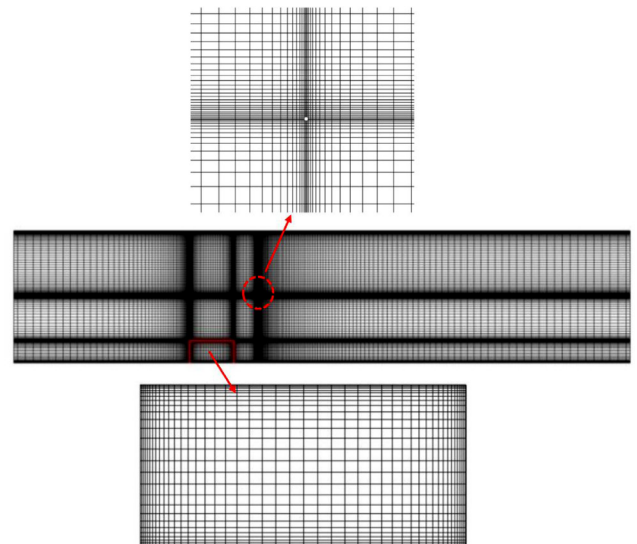
شکل ۲: الگوریتم حل عددی

Fig. 2. Flowchart of numerical solution.



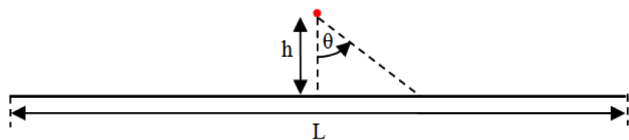
شکل ۴: مقدار رطوبت در لبه حمله

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



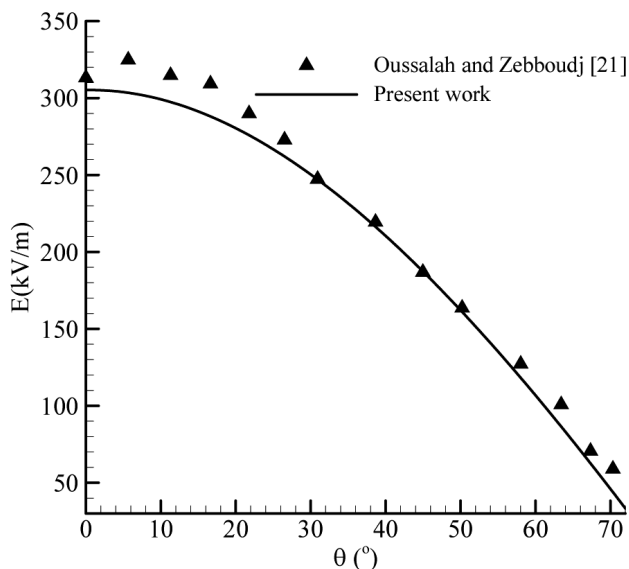
شکل ۳: نمایی از شبکه محاسباتی

Fig. 3. The view of the computational grid.



شکل ۶: نمایی از هندسه دوبعدی اوسالا و زبوج [۲۱]

Fig. 6. View of two-dimensional geometry of Oussalah and Zebboudj's work [21].



شکل ۷: مقدار میدان الکتریکی بر روی صفحه تخت در ولتاژ اعمالی ۱۸ کیلو ولت

Fig. 7. Electric field distribution at the smooth plate, $V=18$ kV.

همچنین دمای اولیه جسم جامد ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۰/۱۳ کیلوگرم به کیلوگرم جسم جامد خشک در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بین نتایج عددی و داده‌های تجربی تطابق مطلوبی برقرار است. لازم به ذکر است که تمامی نتایج ارائه شده در مقاله حاضر با فرض دمای اولیه و رطوبت از مقاله مذکور استخراج شده‌اند.

علاوه بر این به منظور بررسی صحت نتایج میدان الکتریکی و اعتبارسنجی آنها، نتایج تحلیل عددی حاضر با نتایج تجربی اوسالا و زبوج [۲۱] مقایسه شده است. آنها به صورت تجربی توزیع میدان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی بر روی یک صفحه تخت را مورد بررسی قرار دادند. هندسه مورد مطالعه آنها در شکل ۶ به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین زاویه θ بین خط عمود بر صفحه پایینی از الکتروود تزریق‌کننده و خط واصل بین الکتروود تزریق‌کننده به مکانی از الکتروود جمع‌کننده می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر تطابق مطلوبی با داده‌های تجربی دارد.

$$P_e = V \times I \quad (26)$$

در رابطه (۲۶)، ولتاژ اعمالی به الکتروود تزریق‌کننده و I جریان الکتریکی عبوری بر اثر تخلیه کرونا به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$I_e = \int_{A_p} \vec{J}_e \cdot dA = - \int_{A_p} \rho_c \beta_e \frac{\partial V}{\partial n} dA \quad (27)$$

در این رابطه n متغیر مستقل و عمود بر صفحه الکتروود جمع‌کننده می‌باشد.

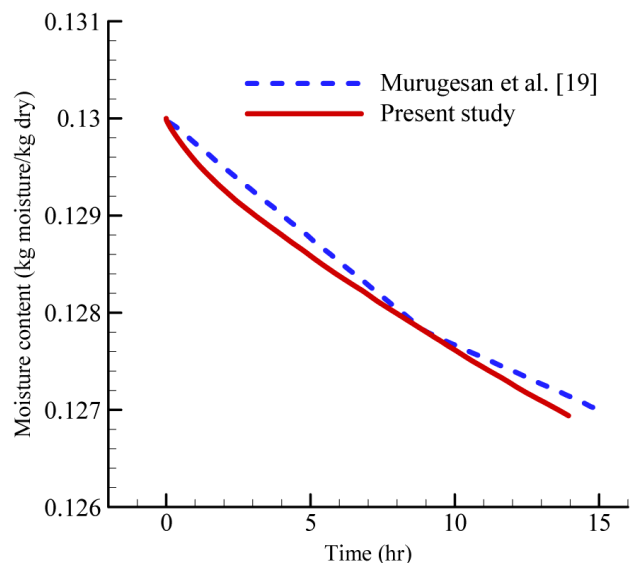
همچنین برای ارزیابی عملکرد محرک الکتروودیدرودینامیک، مصرف انرژی ویژه به عنوان پارامتری مهم مطابق رابطه (۲۸) مورد بررسی قرار گرفته است. مصرف انرژی ویژه عبارت است از انرژی مورد نیاز برای تبخیر واحد جرم رطوبت از جسم مرطوب، که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰].

$$SEC = \frac{P_e}{MR_0 - MR_t} \Delta t \quad (28)$$

در رابطه فوق، MR_t رطوبت متوسط در زمان t است.

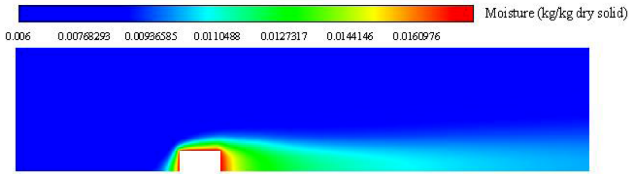
۷- بحث و بررسی نتایج

جهت بررسی صحت نتایج عددی، منحنی خشک‌شدن جسم مرطوب بدون حضور میدان الکتریکی بر حسب زمان با نتایج موروگسان و همکاران [۱۹] در شکل ۵ مقایسه شده است. موروگسان و همکاران [۱۹] به صورت عددی به مطالعه پارامترهای موثر بر خشک‌کردن یک آجر در شرایط دوبعدی در یک کانال مسطح پرداخته‌اند. در این پژوهش هوا با عدد رینولدز ۲۰۰ و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد وارد کانال می‌شود.



شکل ۵: مقایسه رطوبت متوسط در کار حاضر با نتایج موروگسان و همکاران [۱۹]، $Re=200$

Fig. 5. Average moisture comparison of the present work and the result of Murugesan et al. [19], $Re=200$.



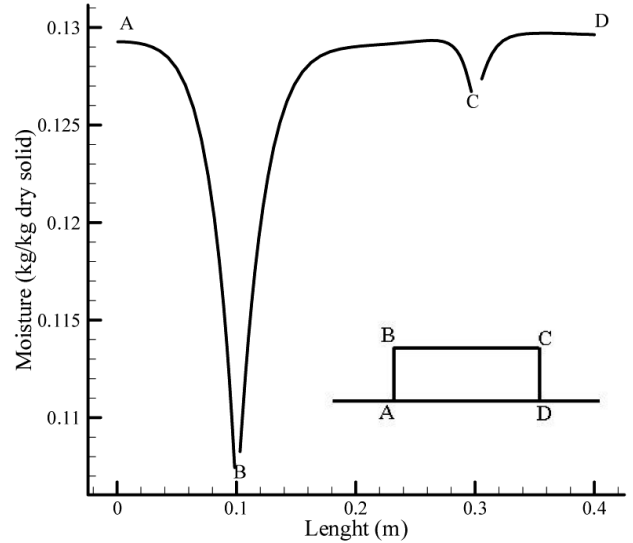
شکل ۹: توزیع غلظت جریان سیال ($Re=500$ و $t=14$ hr)
 Fig. 9. The concentration distribution of fluid flow ($Re=500$, $t=14$ hr).

است. از آنجایی که تغییرات غلظت هوا در لبه حمله جسم تابعی از نرخ تبخیر رطوبت از سطح جسم مرطوب است، بنابراین بالاتر بودن میزان غلظت هوا در اطراف لبه حمله جسم منطقی خواهد بود.

ظرفیت انتقال حرارت و جرم از سطح جسم مرطوب تابعی از اختلاف دما، اختلاف غلظت و نیز اندازه سرعت جریان سیال عبوری است. در لحظه ابتدایی فرآیند خشک کردن به دلیل برابر بودن دمای هوا در اطراف جسم مرطوب، اختلاف دما و غلظت بین هوا و سطح و جسم یکسان بوده و در نتیجه تبخیر رطوبت در همه سطوح به یک میزان صورت می گیرد. از این رو میزان انتقال حرارت و جرم وابسته به جریان هوا بر روی سطوح جسم مرطوب خواهد بود. برای بررسی این موضوع خطوط جریان سیال عبوری از روی جسم مرطوب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به برخورد مستقیم سیال به لبه حمله، انتظار می رود در این ناحیه بیشترین نرخ انتقال حرارت و جرم وجود داشته باشد. با گذر زمان بالاتر بودن اختلاف دما و غلظت در این ناحیه موجب افزایش هر چه بیشتر نرخ انتقال حرارت و رطوبت نسبت به سایر نواحی می شود. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل جدایی جریان در لبه سمت راست و تشکیل گردابه در پشت جسم، انتقال جرم و حرارت در این ناحیه کاهش می یابد.

۷-۲- خشک کردن آجر با اعمال میدان الکتریکی

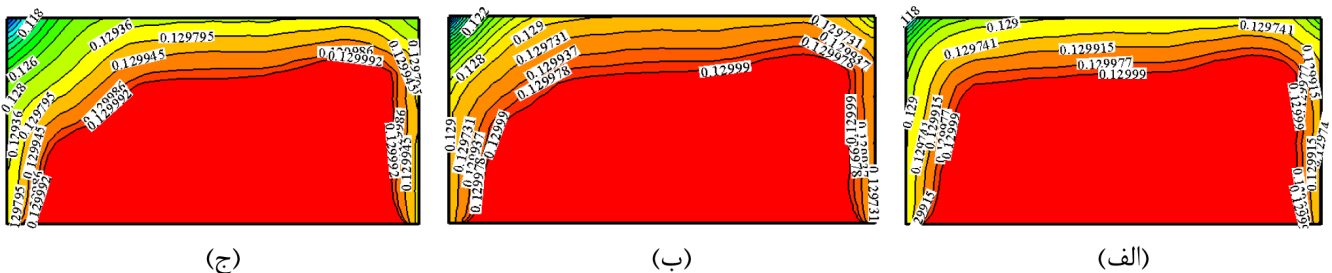
توزیع میدان الکتریکی، چگالی بار الکتریکی و نیروی حجمی اعمال شده از میدان الکتریکی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده



شکل ۷: مقدار رطوبت در سطح جسم مرطوب ($Re=500$ و $t=14$ hr)
 Fig. 7. The moisture value at the surface of wetted body ($Re=500$ and $t=14$ hr)

۷-۱- خشک کردن آجر بدون میدان الکتریکی

دو سازوکار در فرآیند خشک کردن وجود دارد: (۱) حرکت رطوبت از درون جسم مرطوب به سطح جسم؛ (۲) تبخیر رطوبت از سطح و انتقال آن به هوای اطراف جسم مرطوب. در آغاز فرآیند خشک کردن به دلیل گرادیان غلظت، رطوبت از سطح جسم تبخیر شده و به هوا منتقل می شود. در ادامه به دلیل ایجاد گرادیان رطوبت درون جسم، رطوبت از درون جسم به سمت سطح جسم حرکت می کند. مقدار رطوبت در جابه جایی اجباری روی سطح جسم مرطوب در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود کاهش رطوبت سطح جسم در لبه حمله نسبت به سایر سطوح جسم مرطوب محسوس تر می باشد. همچنین در سطح بالایی جسم به دلیل توسعه لایه مرزی، مقدار کاهش رطوبت خروجی کاسته می شود. توزیع رطوبت جسم مرطوب با گذر زمان در شکل ۸ نشان داده شده است. به طور واضح مشخص است که با گذر زمان رطوبت جسم مرطوب کاهش می یابد. توزیع غلظت هوای اطراف جسم مرطوب در شکل ۹ نشان داده شده



شکل ۸: توزیع رطوبت در درون جسم مرطوب ($Re=500$) (الف $t=2$ hr (ب $t=6$ hr (ج $t=14$ hr)
 Fig. 8. Moisture content distribution, $Re=500$, (a) $t=2$ hr; (b) $t=6$ hr; (c) $t=14$ hr.

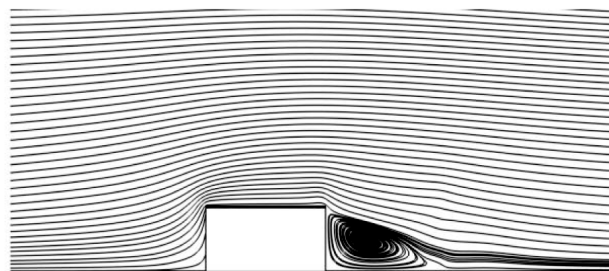
در جهت الکتروود جمع کننده است. همچنین در اطراف صفحه بالایی به دلیل کاهش مقدار چگالی بار الکتریکی، نیروی حجمی نیز به شدت کاهش پیدا می کند (شکل ۱۱(ج)). این موضوع موجب پیدایش جریان ثانویه ای به صورت جت کرونا می شود که در (شکل ۱۱(د)) نشان داده شده است. این جریان از سمت الکتروود تزریق کننده به سمت الکتروود جمع کننده حرکت می کند و موجب برهم زدن الگوی جریان سیال در اطراف جسم مرطوب می شود. همچنین به دلیل برخورد سیال با سطوح جسم مرطوب و صفحه پایینی، جریان سیال به سمت راست و چپ کانال حرکت می کند و پس از آن جریان بازگشتی شکل می گیرد و مناطق چرخشی در اطراف الکتروود تزریق کننده تولید می کند. همچنین خطوط جریان در نواحی بین دو گرداب دارای تراکم بیشتری است که نشان دهنده نواحی سرعت بالا می باشد.

در تحلیل پدیده الکتروودپدینامیک مادامی که ولتاژ اعمالی افزایش یابد، جریان کرونای تخلیه شده بین الکتروود تزریق کننده و الکتروود جمع کننده نیز افزایش می یابد. در این حالت تأثیر میدان الکتریکی بر جریان سیال بیشتر است. با افزایش ولتاژ اعمالی، مولکول های بیشتری از هوا یونیزه شده، بنابراین چگالی بار الکتریکی در محیط افزایش می یابد و در نتیجه انتظار می رود با افزایش چگالی بار الکتریکی در محیط، مقدار نیروی الکتریکی نیز افزایش یابد. این افزایش نیروی الکتریکی منجر به برهم زدن بیشتر جریان سیال می شود. همین با افزایش ولتاژ اعمالی، گردابه ایجاد شده در فضای بالایی کانال حجیم تر می شود. دلیل این امر نیز افزایش قدرت و اثر میدان الکتریکی است که باعث می شود جریان سیال با شدت و حجم بیشتری به سمت صفحه متصل به زمین هدایت شود. به عنوان معیار مناسبی از قدرت گردابه ایجاد شده، اندازه سرعت جریان هوا در اطراف جسم مرطوب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، اندازه سرعت در اطراف جسم مرطوب با افزایش ولتاژ افزایش یافته است و موجب بهبود نرخ انتقال جرم در سطوح جسم مرطوب می شود.

تأثیر ولتاژ اعمالی بر نرخ رطوبت متوسط جسم مرطوب در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان گونه که قبلاً ذکر شد با افزایش ولتاژ اعمالی قدرت جریان ثانویه افزایش می یابد و در نتیجه باعث تشدید برهم زدگی سیال در اطراف آجر می شود. این افزایش برهم زدگی منجر به کاهش لایه مرزی حرارتی و غلظتی در مرز مشترک سیال با آجر می شود. بنابراین سرعت انجام فرآیند خشک کردن با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش یافته است. مطابق نتایج حاضر، رطوبت متوسط جسم مرطوب پس از ۱۴ ساعت، برای ولتاژهای اعمالی ۱۸ و ۲۱ و ۲۴ کیلوولت به ترتیب ۵/۲ و ۱۲/۲ و ۱۶/۷ درصد نسبت به عدم حضور میدان الکتریکی کاهش یافته است.

۷-۳- تأثیر آرایش الکتروود تزریق کننده بر رطوبت متوسط

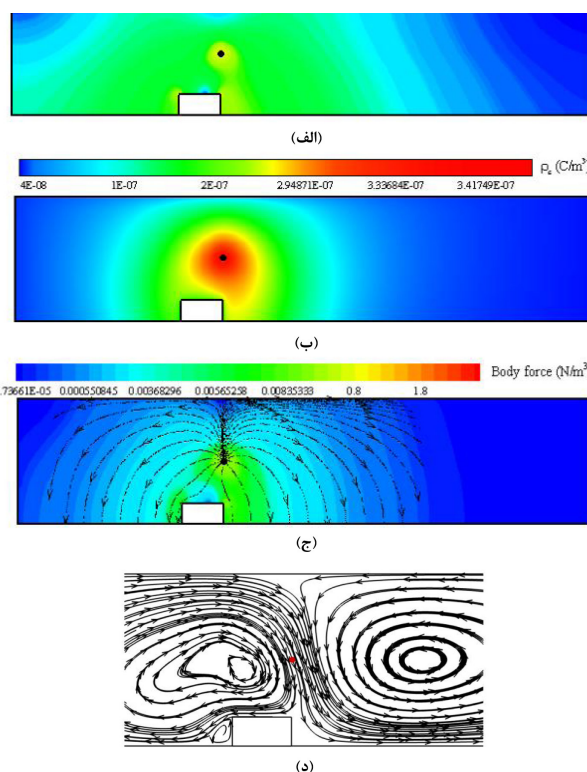
در شکل ۱۴ رطوبت متوسط جسم مرطوب در آرایش های مختلف قرارگیری الکتروود تزریق کننده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، بیشینه کاهش رطوبت در طول ۱۴ ساعت اجرای فرآیند خشک کردن



شکل ۱۰: خطوط جریان سیال ($Re=500$ و $t=14$ hr)

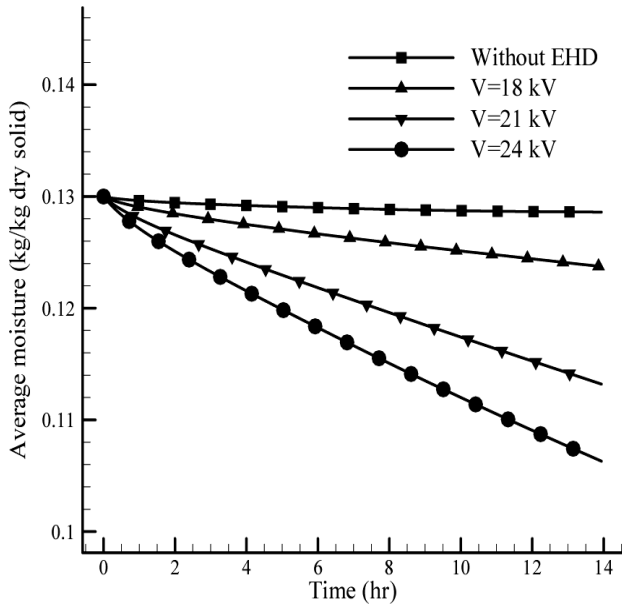
Fig. 10. Streamlines around the moist object ($Re=500$, $t=14$ hr).

می شود، میدان الکتریکی در نواحی اطراف الکتروود تزریق کننده بیشینه است و با نزدیک شدن به صفحه بالایی مقدار آن کاهش می یابد (شکل ۱۱(الف)). همچنین مقدار چگالی بار الکتریکی بر روی الکتروود تزریق کننده بیشینه ($0.341749E-07$ میکروکولن بر مترمکعب) است و با فاصله گرفتن از سطح مذکور، چگالی بار الکتریکی تا 0.448 میکروکولن بر متر مکعب کاهش می یابد (شکل ۱۱(ب)). همان گونه که بیان شده است، توزیع میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی، نیروی حجمی حاصل از میدان الکتریکی را نشان می دهد و بدیهی است که این نیرو در اطراف الکتروود تزریق کننده دارای مقداری بیشینه و نیز



شکل ۱۱: (الف) توزیع میدان الکتریکی، (ب) توزیع چگالی بار الکتریکی، (ج) توزیع نیروی کولمب و (د) خطوط جریان ($V=18$ kV)

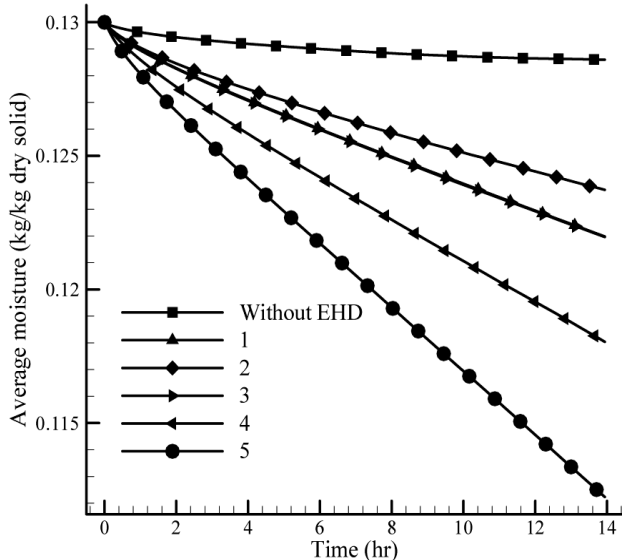
Fig. 11. (a) electric potential distribution; (b) electric space charge density distribution; (c) Coulomb force distribution; (d) streamlines, $V=18$ kV.



شکل ۱۳: رطوبت متوسط جسم مرطوب در ولتاژ مختلف ($Re=500$)

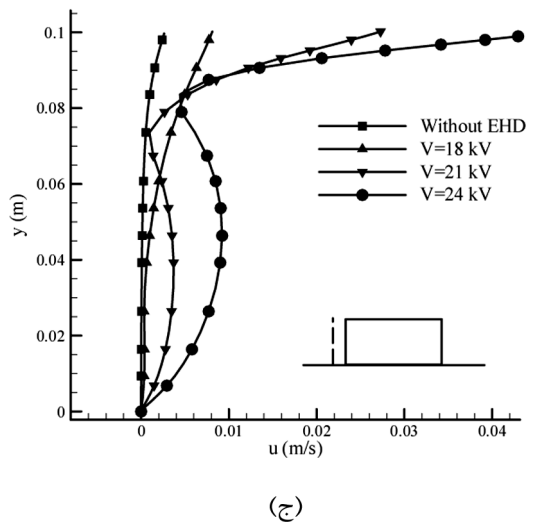
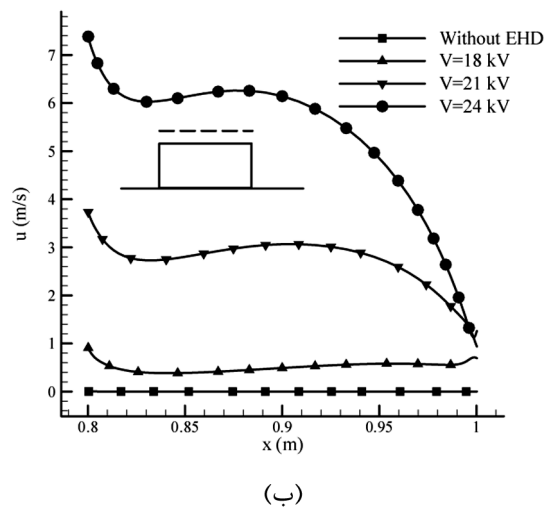
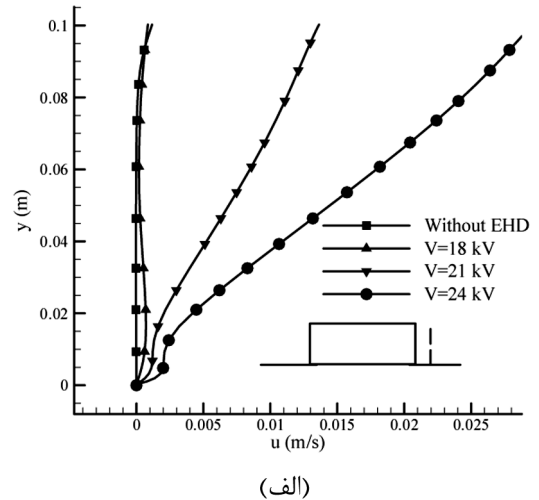
Fig. 13. Average moisture content of the moist object at different applied voltages ($Re=500$).

در آرایش ۵ حاصل شده است. دلیل این امر را می‌توان اینگونه توجیه نمود که در این آرایش، هوا همچنان با رطوبت ورودی با آجر برخورد می‌کند و تحت تأثیر رطوبت آجر قرار نگرفته است. اما در دیگر آرایش‌ها، رطوبت هوای اطراف آجر تحت تأثیر رطوبت خارج شده از آجر قرار می‌گیرد و قابلیت حمل



شکل ۱۴: رطوبت متوسط جسم مرطوب در آرایش‌های افقی الکترود تزریق‌کننده ($Re=500$ و $V=18$ kV)

Fig. 14. The average moisture content of the moist object at different horizontal arrangements of emitting electrode ($Re=500$, $V=18$ kV).



شکل ۱۲: توزیع سرعت در اطراف جسم مرطوب در ولتاژهای اعمالی مختلف ($Re=500$) سمت راست جسم مرطوب، (ب) سمت بالای جسم مرطوب و (ج) سمت چپ جسم مرطوب

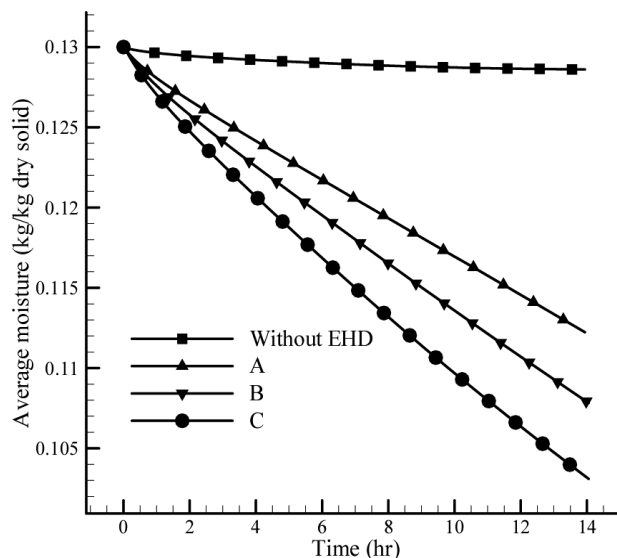
Fig. 12. Velocity profiles around the moist object at different applied voltages, $Re=500$, (a) right side of moist object; (b) top side of moist object; (c) left side of moist object.

الکتريکی کاهش یافته، در نتیجه رطوبت خروجی کاهش می‌یابد. مطابق نتایج عددی حاضر، در طول ۱۴ ساعت اجرای فرآیند، افزایش رطوبت خروجی از جسم مرطوب برای حالت‌های A و B و C نسبت به حالت بدون اعمال میدان الکتریکی، به ترتیب برابر ۱۲/۵۹ و ۱۵/۹۸ و ۱۹/۶۱ درصد است.

۷-۴- تأثیر آرایش الکترود تزریق‌کننده بر توان مصرفی

توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه به عنوان دو پارامتر مهم در استفاده از محرک الکتروهایدرودینامیک می‌باشد. در جدول ۲ رطوبت خروجی از جسم مرطوب، توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه برای ولتاژهای مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ولتاژ به دلیل افزایش چگالی بار الکتریکی و میدان الکتریکی، مقدار جریان الکتریکی مابین الکترود تزریق‌کننده و الکترود جمع‌کننده افزایش یافته و به تبع آن، توان مصرفی نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه سرعت فرآیند خشک‌کردن با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد، مصرف انرژی ویژه روش الکتروهایدرودینامیک با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش ولتاژ اعمالی، میزان رطوبت خروجی به ازای توان مصرفی جهت تخلیه کرونا کاهش یافته لذا در ولتاژهای اعمالی پایین استفاده از میدان الکتریکی مقرون به صرفه‌تر است.

رطوبت خروجی از جسم مرطوب، توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه تابعی از مکان افقی الکترود تزریق‌کننده در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در آرایش ۵ به دلیل افزایش مقدار جریان الکتریکی مابین الکترود تزریق‌کننده و الکترود جمع‌کننده، توان مصرفی بیشینه است و با افزایش فاصله الکترود از ورودی کانال کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود، علی‌رغم اینکه سرعت فرآیند خشک‌کردن در آرایش ۵ افزایش می‌یابد، مصرف انرژی ویژه در این آرایش به دلیل بالا بودن توان مصرفی نسبت به آرایش ۴ بیشتر است. در واقع استفاده از میدان الکتریکی در آرایش ۴ نسبت به سایر آرایش‌ها مقرون به صرفه‌تر است. در جدول ۴ رطوبت خروجی از جسم مرطوب، توان مصرفی و مصرف



شکل ۱۵: رطوبت متوسط جسم مرطوب در آرایش‌های عمودی الکترود تزریق‌کننده ($Re=500$ و $V=18$ kV)

Fig. 15. The average moisture content of the moist object at different vertical arrangements of emitting electrode ($Re=500$, $V=18$ kV).

رطوبت سیال از سطح آجر در این آرایش‌ها کاهش می‌یابد. مطابق با نتایج حاضر، افزایش رطوبت خروجی از جسم مرطوب برای آرایش ۵، ۱۲/۵۹ درصد بیشتر از رطوبت خروجی از جسم مرطوب در حالت بدون اعمال الکتریکی است. این اختلاف برای حالت‌های ۴ و ۳ و ۲ و ۱ به ترتیب برابر ۸/۱۲ و ۵/۱۰ و ۳/۷۵ و ۵/۰۹ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر اینکه اعمال میدان الکتریکی تأثیر بسزایی در افزایش انتقال جرم دارد، نحوه قرارگیری الکترودهای تزریق‌کننده هم به‌طور چشمگیری بر مقدار رطوبت متوسط تأثیر می‌گذارد.

در شکل ۱۵ رطوبت متوسط جسم مرطوب در آرایش‌های عمودی الکترود تزریق‌کننده نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله الکترود تزریق‌کننده از الکترود جمع‌کننده قدرت میدان

جدول ۲: رطوبت خروجی، توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه تابعی از ولتاژ اعمالی ($Re=500$)

Table 2. Removed moisture, power consumption and specific energy consumption at different applied voltages ($Re=500$).

ولتاژ اعمالی (kV)	رطوبت خروجی (kg/kg dry solid)	توان مصرفی (W)	مصرف انرژی ویژه (kJ/kg)
۱۸	۰/۰۰۶۲۷۲۲	۰/۰۰۷۷۳۱۰	۶۲/۱۳۹
۲۱	۰/۰۱۶۸۰۱۲	۰/۰۲۷۳۷۹	۸۲/۱۳۴
۲۴	۰/۰۲۳۶۹۹۱	۰/۰۶۱۵۰۵	۱۳۰/۸۰

جدول ۳: رطوبت خروجی، توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه تابعی از آرایش افقی الکترود تزریق کننده ($Re=500$ و $V=18$ kV)

Table 3. Removed moisture, power consumption and specific energy consumption at different horizontal arrangements of emitting electrode ($Re=500$, $V=18$ kV).

مکان الکترود تزریق کننده	رطوبت خروجی (kg/kg dry solid)	توان مصرفی (W)	مصرف انرژی ویژه (kJ/kg)
۱	۰/۰۰۸۰۲۰۱	۰/۰۱۶۳۵۲	۱۰۲/۶۲
۲	۰/۰۰۶۲۷۲۲	۰/۰۰۷۷۳۳	۶۲/۱۳۹
۳	۰/۰۰۸۰۳۷۳	۰/۰۰۹۴۹۶	۵۹/۵۴۹
۴	۰/۰۱۱۹۶۰۸	۰/۰۱۰۳۳۳	۴۳/۵۳۹
۵	۰/۰۱۷۷۶۷۲	۰/۰۱۹۴۵۹	۵۵/۲۰۱

جدول ۴: رطوبت خروجی، توان مصرفی و مصرف انرژی ویژه تابعی از مکان عمودی الکترود تزریق کننده ($Re=500$ و $V=18$ kV)

Table 4. Removed moisture, power consumption and specific energy consumption at different vertical arrangements of emitting electrode ($Re=500$, $V=18$ kV).

مکان الکترود تزریق کننده	رطوبت خروجی (kg/kg dry solid)	توان مصرفی (W)	مصرف انرژی ویژه (kJ/kg)
A	۰/۰۱۷۷۶۷	۰/۰۱۹۴۵۹	۵۵/۲۰۱
B	۰/۰۲۱۰۱۶	۰/۰۲۱۴۰۷	۴۸/۸۱۷
C	۰/۰۲۶۸۲۰	۰/۰۳۹۰۶۵	۷۳/۴۱۲

می‌کند که باعث افزایش انتقال حرارت و جرم و به تبع آن، افزایش سرعت فرآیند خشک کردن می‌شود به طوری که رطوبت جسم مرطوب پس از ۱۴ ساعت برای ولتاژهای اعمالی ۱۸ و ۲۱ و ۲۴ کیلوولت به ترتیب ۵/۲ و ۱۲/۲ و ۱۶/۷ درصد نسبت به عدم حضور میدان الکتریکی کاهش یافته است. به منظور دستیابی به افزایش هرچه بیشتر انتقال حرارت و جرم، آرایش‌های مختلفی از الکترود تزریق کننده در نظر گرفته شده است. در آرایش‌های افقی، آرایشی که الکترود تزریق کننده در سمت چپ جسم مرطوب و در آرایش‌های عمودی، آرایشی که الکترود تزریق کننده در نزدیک‌ترین حالت به جسم مرطوب قرار گرفته است دارای بیشترین نرخ انتقال جرم و همچنین بیشترین سرعت خشک کردن می‌باشد. به منظور ارزیابی اقتصادی فرآیند، مصرف انرژی ویژه به عنوان پارامتر مهم معرفی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده اعمال ولتاژ ۱۸ کیلوولت به دلیل مصرف انرژی ویژه پایین نسبت به ولتاژ ۲۱ و ۲۴ کیلوولت، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. علاوه بر این نتایج حاکی از آن است که آرایش الکترود تزریق کننده بر مصرف انرژی الکتریکی و انرژی ویژه تأثیر چشمگیری دارد.

انرژی ویژه برای فواصل عمودی مختلف الکترود تزریق کننده و الکترود جمع کننده ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش فاصله الکترود تزریق کننده و جمع کننده به دلیل افزایش چگالی بار الکتریکی و میدان الکتریکی، مقدار جریان الکتریکی مابین الکترودها افزایش می‌یابد و در نتیجه توان مصرفی نیز افزایش می‌یابد. به دلیل کاهش سرعت خشک کردن در آرایش A و افزایش مصرف انرژی در آرایش C، مشاهده می‌شود آرایش B دارای کمترین مقدار مصرف انرژی ویژه و در نتیجه بهینه‌ترین حالت می‌باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، تأثیر محرک الکترو هیدرودینامیک بر نرخ خشک کردن جسم مرطوب به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی میدان جریان و نرخ خشک شدن یک جسم مرطوب تحت اثر باد کرونا است. همچنین تأثیر پارامترهایی همچون ولتاژ اعمالی و موقعیت الکترود تزریق کننده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، یونیزاسیون حاصل از آن گردابه‌های قوی‌تر و حجیم‌تری را تولید

فهرست علائم

ضریب گذردهی الکتریکی ($F.m^{-1}$)	ϵ_e		
چگالی ($kg.m^{-3}$)	ρ		علائم انگلیسی
چگالی حجمی بار الکتریکی ($C.m^{-3}$)	ρ_c	مساحت الکتروود جمع کننده (m^2)	A_p
هدایت الکتریکی ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)	σ_e	غلظت ($kg.m^{-3}$)	C
عدد پرانتل آشفته‌گی برای مدل ($k-\epsilon$)	σ_ϵ و σ_k	ظرفیت گرمایی ویژه ($J.kg^{-1}K^{-1}$)	C_p
زیرنویس		ضرایب ثابت مدل آشفته‌گی ($k-\epsilon$)	C_μ و $C_{2\epsilon}$ و $C_{1\epsilon}$
سیال	f	طول هیدرولیکی (m)	D_h
ورودی	in	میدان الکتریکی ($V.m^{-1}$)	E
فاز مایع	l	نیروی حجمی الکتروهیدرودینامیکی ($N.m^{-3}$)	F_e
جسم مرطوب	s	جریان الکتریکی (A)	I_e
آشفته	t	چگالی جریان الکتریکی ($A.m^{-2}$)	J_e
فاز بخار	v	انرژی جنبشی آشفته‌گی (J)	k
سطح دیواره	w	طول کانال (m)	L
		رطوبت kg/kg dry solid	M
		توان الکتریکی (W)	P_e
		عدد پرانتل	Pr
		عدد رینولدز	Re
		عدد اشمیت	Sc
		مصرف ویژه انرژی (kj/kg)	SEC
		دما ($^{\circ}C$)	T
		پتانسیل الکتریکی (V)	V
		علائم یونانی	
		یونپذیری هوا ($m^2V^{-1}s^{-1}$)	β_e
		نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفته‌گی (W)	ϵ

منابع و مراجع

- [1] T. Bajgai, F. Hashinaga, High electric field drying of Japanese radish, *Drying Technology*, 19(9) (2001) 2291-2302.
- [2] M. Molki, P. Damronglerd, Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer for developing air flow in square ducts, *Heat Transfer Engineering*, 27(1) (2006) 35-45.
- [3] S. Ayuttaya, C. Chaktranond, P. Rattanadecho, M. Transfer, 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*, 64 (2013) 361-374.
- [4] 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*, 71(4) (2013) 656-665.
- [5] G. Heidarinejad, R. Babaei, Numerical investigation of electro hydrodynamics (EHD) enhanced water evaporation using Large Eddy Simulation turbulent

- Mechanical Engineering, 17(1) (2017) 383-393.
- [14] A. Castellanos, A. Ramos, A. Gonzalez, N.G. Green, H. Morgan, Electrohydrodynamics and dielectrophoresis in microsystems: scaling laws, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(20) (2003) 2584.
- [15] K. Adamiak, P. Atten, Simulation of corona discharge in point-plane configuration, *Journal of electrostatics*, 61(2) (2004) 85-98.
- [16] J. Zhang, F. Lai, Effect of emitting electrode number on the performance of EHD gas pump in a rectangular channel, *Journal of Electrostatics*, 69(6) (2011) 486-493.
- [17] M. Huang, F. Lai, Numerical study of EHD-enhanced forced convection using two-way coupling, *Journal of Heat Transfer*, 125(4) (2003) 760-764.
- [18] J.H. Davidson, E. Shaughnessy, Turbulence generation by electric body forces, *Experiments in fluids*, 4(1) (1986) 17-26.
- [19] K. Murugesan, H. Suresh, K. Seetharamu, P.A. Narayana, T. Sundararajan, M. Transfer, A theoretical model of brick drying as a conjugate problem, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(21) (2001) 4075-4086.
- [20] A. Martynenko, T. Kudra, technology, Electrically-induced transport phenomena in EHD drying—A review, *Trends in food science & technology*, 54 (2016) 63-73.
- [21] N. Oussalah, Y. Zebboudj, Finite-element analysis of positive and negative corona discharge in wire-to-plane system, *The European Physical Journal-Applied Physics*, 34(3) (2006) 215-223.
- model, *Journal of Electrostatics*, 77 (2015) 76-87.
- [6] M. Peng, T. Wang, X. Wang, M. Transfer, Effect of longitudinal electrode arrangement on EHD-induced heat transfer enhancement in a rectangular channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93 (2016) 1072-1081.
- [7] Y. Chen, N. Barthakur, N. Arnold, Electrohydrodynamic (EHD) drying of potato slabs, *Journal of Food Engineering*, 23(1) (1994) 107-119.
- [8] N. Amanifard, A. Haghi, A numerical study on drying of porous media, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 25(2) (2008) 191.
- [9] M.J. Dalvand, S.S. Mohtasebi, S. Rafiee, Effect of needle number on drying rate of kiwi fruit in EHD drying process, *Agricultural Sciences*, 4(01) (2013).
- [10] S.T. Dinani, M. Havet, Products, Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices, *Industrial Crops and Products*, 70 (2015) 417-426.
- [11] A. Martynenko, W. Zheng, Electrohydrodynamic drying of apple slices: Energy and quality aspects, *Journal of Food Engineering*, 168 (2016) 215-222.
- [12] M. Yang, C. Ding, Electrohydrodynamic (EHD) drying of the Chinese wolfberry fruits, *SpringerPlus*, 5(1) (2016) 909.
- [13] F. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Daylami, Kh. Yazdani, Numerical analysis of the electric field effect on mass transfer through a moist object, *Modares*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

F. Dolati, N. Amanifard, H. Mohaddes Deylami, Kh. Yazdani, Analysis of Corona Wind Effect on Mass Transfer and Energy Consumption in Drying of Moist Object, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 51(2) (2019) 281-295.
DOI: 10.22060/mej.2017.12573.5370

