

بررسی تجربی اثر تغییرات پلاریته الکترو سوزنی بر افزایش تبخیر آب به روش الکتروهیدرودینامیکی

مجتبی پناهی^۱

کارشناسی ارشد

در مقاله حاضر تاثیر حضور میدان الکتریکی با پلاریته مثبت و منفی و دیگر پارامترهای مختلف نظیر سرعت جریان هوای محوری، فواصل الکترودی، ولتاژ الکتریکی و شدت جریان الکتریکی بر نسبت تبخیر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. آزمایش‌ها با پلاریته مثبت و منفی و فواصل الکترودی ۲، ۳ و ۴ cm و با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s انجام گرفتند. اعمال میدان الکتریکی بین الکترودهای سوزنی و صفحه‌ای با تشکیل پلازما حول الکترودهای سوزنی موجب حرکت توده هوا (باد کرونا) می‌گردد. برخورد باد به سطح آب و ایجاد اغتشاش در لایه هوای اشباع مجاور سطح آب، افزایش آهنگ تبخیر را به دنبال دارد. به منظور بررسی تاثیر هر یک از متغیرهای فوق بر روی میزان بهبود تبخیر دو آزمایش، یکی در حضور و دیگری بدون اعمال میدان الکتریکی انجام شد.

علی اکبر عالم رجبی^۲

دانشیار

طبق نتایج به دست آمده با تغییر پلاریته منفی به مثبت در سرعت جریان هوای محوری از ۱٫۷۵ m/s، در فاصله الکترودی ثابت ۳ cm، ۲۹٫۱۱ درصد میزان تبخیر را افزایش می‌دهد. در انتها به کمک برازش داده‌های آزمایشگاهی، روابطی ارائه شده است که در محدوده ولتاژ شروع کرونا تا ولتاژ شکست صادق می‌باشند.

واژه‌های راهنما: الکتروهیدرودینامیک^۳، بهبود تبخیر، باد کرونا^۴، میدان الکتریکی

۱- مقدمه

انتقال جرم و تبخیر آب از یک سطح مرطوب در نتیجه اختلاف غلظت بخار آب در مجاورت سطح با هوای بالای آن صورت می‌گیرد. همواره لایه نازکی از هوای اشباع به عنوان مانعی در برابر تبخیر روی سطح مرطوب را پوشانده است. در صورتی که هوای بالای سطح ساکن باشد فرآیند تبخیر توسط پخش ذرات بخار آب در داخل هوا صورت می‌گیرد. از این رو تبخیر در حالت طبیعی به کندی صورت می‌گیرد. علاوه بر افزایش دمای جسم مرطوب هر روش دیگری که بتواند موجب ایجاد اغتشاش در لایه اشباع مجاور سطح گردد با افزایش اختلاف غلظت بخار بین هوای مجاور سطح و توده هوای بالای آن منجر به افزایش نرخ تبخیر می‌گردد. روش‌های رایج برای افزایش تبخیر عموماً شامل استفاده از جریان هوایی با درجه حرارت بالا یا گرمایش

^۱ نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان m.panahi@me.iut.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان rajabi@cc.iut.ac.ir

^۳ Electrohydrodynamic

^۴ Corona Wind

تابشی هستند که به دلیل مصرف بالای انرژی بازده کمی دارند. یکی از روش‌های نوین در این زمینه استفاده از میدان الکتریکی قوی است. اعمال میدان الکتریکی قوی در هوای مجاور سطح موجب ایجاد باد یونی (جریان ثانویه) و برهم زدن لایه اشباع مجاور سطح می‌گردد که افزایش آهنگ تبخیر را به همراه دارد. از آنجا که اعمال میدان الکتریکی موجب ایجاد تحرک و پویاسازی سیال می‌گردد، این روش را روش الکتروهیدرودینامیکی می‌نامند. اولین استفاده از کرونا برای روبش ذرات غبار به هولند (۱۸۲۴) نسبت داده می‌شود. اکنون این تصفیه‌کننده‌ها کاملاً به صورت صنعتی در آمده و شرکت‌های نیروگاهی بزرگی همچون آلستوم و زیمنس برای کاهش آلودگی گاز خروجی از دودکش‌های صنعتی این محصول را در انواع مختلف تولید و نصب می‌نمایند [۱ و ۲]. نیروی الکتروهیدرودینامیک در حالت کلی شامل سه جزء اصلی است که توسط رابطه (۱) بیان می‌گردند [۳].

$$F_e = \rho_e E - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[E^2 \rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \right] \quad (1)$$

اولین عبارت در سمت راست این رابطه نیروی حجمی الکتروفورتیک یا کولمب است که از طرف میدان الکتریکی بر بارهای آزاد وارد می‌شود و موجب حرکت آنها می‌گردد. میزان این نیرو با چگالی بارهای الکتریکی موجود در سیال (ρ_e) و شدت میدان الکتریکی (E) متناسب است. نیروی دوم با تغییر ضریب نفوذپذیری الکتریکی ($\nabla \varepsilon$) ایجاد می‌شود. تغییرات چگالی و دمای سیال از عواملی هستند که می‌توانند موجب تغییر ضریب نفوذپذیری الکتریکی گردند [۴-۵]. نیروی سوم ناشی از تغییرات شدت میدان الکتریکی در فضای بین دو الکتروود و همچنین تغییرات ضریب نفوذپذیری الکتریکی است. در انتقال حرارت تک فاز و تشدید تبخیر نیروی کولمب نقش اصلی را ایفا می‌کند در حالی که سایر نیروها در جریان‌های دو فاز حایز اهمیت هستند. پناهی و عالم‌رجبی [۶] در نتایج خود اعلام کردند که نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک در فواصل الکتروودی متفاوت تقریباً یکسان می‌باشد که بیانگر تاثیر غالب باد یونی (نیروی کولمب) در نسبت تبخیر است.

سادک [۷] برای جلوگیری از تجمع حباب گازهای غیر قابل چگالش در سطح مشترک بخار و مایع استفاده کرد و همچنین باتری موز [۸]، برای تقویت چگالش خارجی مبرد در دمای اشباع را بر روی لوله پره‌دار افقی بررسی قرار داد و گزارش کرد که به کارگیری روش الکتروهیدرودینامیک ضریب انتقال گرما را از ۲۷ تا ۱۱۰٪، متناسب با ولتاژ اعمالی افزایش داد و در تحقیقات دیگر این نکته ابراز شد که با اعمال میدان و افزایش آن نرخ چگالش به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و رژیم جریان تغییر می‌کند [۹-۱۶]. در پژوهش تجربی دیگر مورثو [۱۷] قابلیت باد یونی در کنترل جریان بر روی یک صفحه تخت مورد بررسی قرار داد و نتایج آن حاکی از افزایش سرعت باد یونی با افزایش جریان الکتریکی و کاهش نیروی پسا به میزان ۳۰٪ می‌باشد. شایان ذکر است که در زمینه به کارگیری از روش الکتروهیدرودینامیکی به منظور بهبود انتقال جرم تحقیقات زیادی با استفاده آرایش‌های مختلف الکتروودی انجام گرفته است [۱۸-۲۱].

در این زمینه می‌توان به پژوهش کامکاری و عالم‌رجبی [۲۲] که به بررسی اثر عوامل تاثیر گذار بر افزایش نرخ انتقال جرم مانند قطر و پلاریته الکتروود سیمی، فواصل الکتروودی و سرعت جریان هوای محوری پرداختند،

اشاره کرد. آنها در پژوهش خود گزارش کردند که افزایش فاصله الکترودها موجب به تاخیر افتادن ولتاژ شروع کرونا و ولتاژ شکست می شود و از شدت جریان کرونای شکست کاسته می شود و در پژوهشی دیگر دارابی [۲۳] که نسبت تبخیر ۴ تا ۸/۵ برابری را برای آب به روش الکتروهیدرودینامیکی گزارش کرد. بارتاکور [۲۴] هم در آزمایشی اقدام به بررسی قابلیت باد یونی در افزایش نرخ تبخیر محلول پتاسیم کلرید (KCl) در آب توسط الکتروود سوزنی نمود و نسبت تبخیر برای شار مثبت ۲/۵ و برای شار منفی ۳/۵ برابر نسبت به حالت عدم اعمال میدان الکتریکی را گزارش کرد. پناهی و عالم‌رجبی [۶ و ۲۵] نیز با استفاده از یک الکتروود سوزنی و پلاریته مثبت گزارش کردند که با افزایش سرعت جریان هوای محوری در فواصل الکتروودی پایین بر میزان تاثیر نسبی میدان الکتریکی بر تشدید تبخیر افزوده می شود به طوری که در نزدیکی ولتاژ شکست با افزایش سرعت هوا از ۰/۲۵ تا ۱/۷۵ m/s میزان بهبود تبخیر تا ۱۸/۸۶٪ افزایش یافته و از ۴/۶۵۷۹ به ۵/۵۳۶۷ برابر می رسد و لای و شارما [۲۶] هم برای نسبت تبخیر آب از ظرف حاوی گلوله های شیشه ای تنها با اعمال میدان الکتریکی توسط الکتروود سوزنی به قطر ۰/۰۹ cm و در ارتفاع ۲/۵۴ cm از سطح آب حداکثر بهبود تبخیر ۱/۳۸۹۲ در سرعت هوای محوری ۱/۰۰ m/s گزارش شد و با اعمال همزمان میدان الکتریکی و جریان هوای محوری با سرعت ۲/۸ m/s تاثیر محسوسی گزارش نشد.

در مقاله حاضر هدف بررسی تاثیر اعمال کرونای مثبت و منفی در سرعت های هوای محوری و همچنین در فواصل الکتروودی مختلف بر چگونگی نسبت تبخیر به روش الکتروهیدرودینامیک می باشد.

۲- باد کرونا

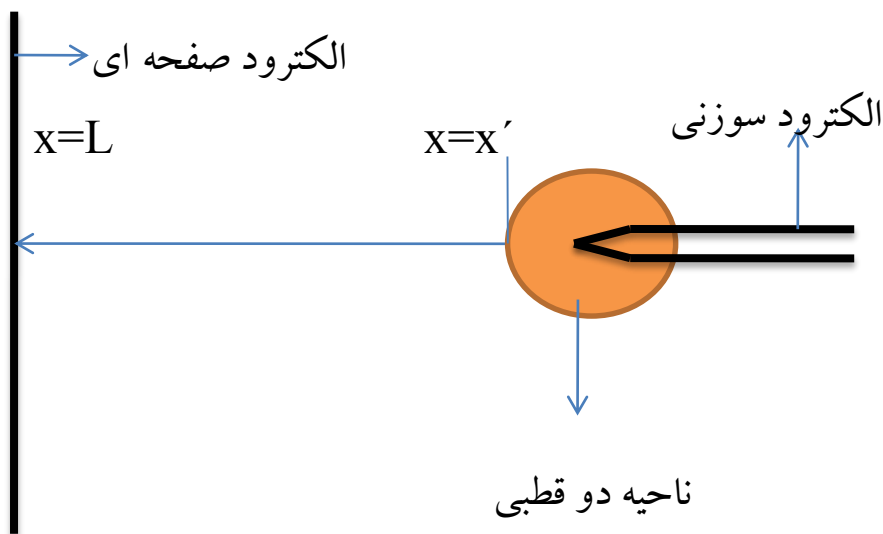
از آنجا که هدف اصلی در مقاله حاضر بررسی تاثیر اعمال باد کرونای مثبت و منفی در سرعت های مختلف هوای محوری بر میزان نسبت تبخیر است، در ادامه چگونگی تشکیل باد کرونا به اختصار شرح داده می شود. در الکتریسیته، تخلیه کرونا یک تخلیه الکتریکی موضعی است که به همراه یونیزاسیون هوا در مجاورت الکتروودی با شعاع انحنای کوچک و ولتاژ بالا رخ می دهد. برای تخلیه کرونا معمولاً از دو الکتروود، یکی با شعاع انحنای کوچک و دیگری با شعاع انحنای بزرگ مانند الکتروود سوزنی و صفحه استفاده می شود. شعاع انحنای کوچک تضمین کننده تغییرات شدید پتانسیل الکتریکی در اطراف الکتروود است. یونیزه شدن هوای مجاور الکتروود به صورت ظاهری قطر الکتروود را افزایش می دهد. بدین ترتیب به شعاع انحنای الکتروود افزوده شده و پیشروی فرآیند یونیزاسیون متوقف می شود. در خارج این ناحیه ذرات باردار خود را به الکتروود مقابل رسانده و خنثی می شوند. ذرات باردار در مسیر حرکت خود به سمت الکتروود مقابل با مولکول های خنثی هوا برخورد کرده و با تبادل ممنتوم، جریانی از توده هوا را به نام باد کرونا ایجاد می کنند. ولتاژ اعمالی به الکتروود با شعاع انحنای کوچک تعیین کننده نوع کرونا می باشد اگر الکتروود نازک دارای پتانسیل مثبت باشد، تخلیه کرونا مثبت و اگر منفی باشد تخلیه کرونا منفی نامیده می شود. فیزیک کرونای مثبت و منفی هر چند در کلیات مشابه هستند ولی در جزئیات متفاوتند و به دلیل متفاوت بودن قابلیت تحرک یونی یونهای مثبت و منفی بادهای یونی تشکیل شده نیز متفاوت هستند. کرونای مثبت به همراه هاله ای از نور آبی رنگ پیوسته در اطراف الکتروود مشخص می شود که به دلیل تشکیل پلازما در اطراف آن است. با یک هندسه و ولتاژ مشخص، ابعاد این ناحیه نورانی اندکی کوچکتر از مورد مشابه آن در کرونای منفی است. تعداد الکترون ها در کرونای

مثبت نسبت به کروناى منفى کمتر است ولى به دليل حرکت الکترون‌ها به سمت الکتروود ظريف يعنى ناحیه با میدان الکتريکى قویتر، انرژی آنها بیشتر است و همچنین کروناى منفى نیز به همراه هاله‌ای از نور قرمز رنگ غير پیوسته در اطراف الکتروود مشخص می‌شود. در کروناى منفى الکترون‌ها از سطح الکتروود دور می‌شوند بنابراین ناحیه نورانى حول الکتروود اندکى بزرگ‌تر از کروناى مثبت است. ضمناً این الکترون‌ها به دليل قرار گرفتن در ناحیه‌ای با میدان الکتريکى ضعیف‌تر، از انرژی کمتری نسبت به الکترون‌های کروناى مثبت برخوردار هستند [۲۷].

فرض می‌کنیم سوزن، قطب مثبت و صفحه، قطب منفى باشد (شکل ۱). در اطراف سوزن اولين يونيزاسيون به وجود می‌آید. الکترون‌های به وجود آمده سریعاً جذب آند (سوزن) می‌شوند در حالی که یون‌ها که از تحرک کمتری برخوردارند تقریباً در محل خود باقى می‌مانند و در آنجا تجمعی نسبى از یون‌های مثبت به وجود می‌آید. در نتیجه‌ی میدان حاصل از این بارها شدت میدان الکتريکى در اطراف سوزن کاهش می‌یابد، در حالی که شدت میدان الکتريکى در ناحیه‌ی وسط سوزن و صفحه بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر میدان الکتريکى یکنواخت‌تر می‌شود و در مورد سوزن، قطب منفى و صفحه، قطب مثبت، بارهای فضایی به طور معکوس عمل می‌نمایند. به این معنی که بارهای فضایی باعث افزایش شدت میدان الکتريکى در اطراف سوزن شده و از شدت میدان الکتريکى نقاط دیگر تا حدی کاسته می‌شود [۲۵]. ابتدا توزیع میدان الکتريکى (E) ناشی از حضور بارهای آزاد را در فضای بین دو الکتروود به دست می‌آوریم [۲۶].

$$E^2 - E_0^2 = \frac{I(x - x_0)}{Ab\epsilon_0} \quad (2)$$

در این رابطه E_0 شدت میدان بین دو الکتروود، A مساحت الکتروود صفحه‌ای، b قابلیت تحرک یونی که برای یون‌های مثبت و منفى، x_0 فاصله بین الکتروودها و I شدت جریان بین دو الکتروود می‌باشد. به کمک قوانین بقای انرژی و معادله گوس می‌توان رابطه بین سرعت باد یونی و میدان الکتريکى را به دست آورد.



شکل ۱- نمایش ناحیه دو قطبى اطراف الکتروود سوزنی

$$\begin{cases} \rho_g U_e^2 = \int_{x=x_0}^{x=L} \rho_e E dx \\ \nabla \cdot E = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \end{cases} \Rightarrow U_e = \sqrt{\frac{\epsilon_0 (E^2 - E_0^2)}{\rho_g}} \quad (3)$$

نهایتاً با جایگذاری رابطه (۲) در (۳) و صرف نظر کردن از x_0 در برابر L ، سرعت باد یونی بر حسب جریان الکتریکی به دست می‌آید.

$$U_e = \sqrt{\frac{IL}{\rho_g A b}} \quad (4)$$

در استخراج رابطه فوق دیده می‌شود که می‌توان میدان الکتریکی متوسط اولیه بین الکترود سوزنی و صفحه‌ای برابر میدان الکتریکی با فاصله L و اختلاف پتانسیل V است و با حل معادلات الکتریکی و به کمک قانون بقای انرژی تخمینی از سرعت باد یونی در زیر الکترود سوزنی به دست می‌آید. [۲۸-۳۰].

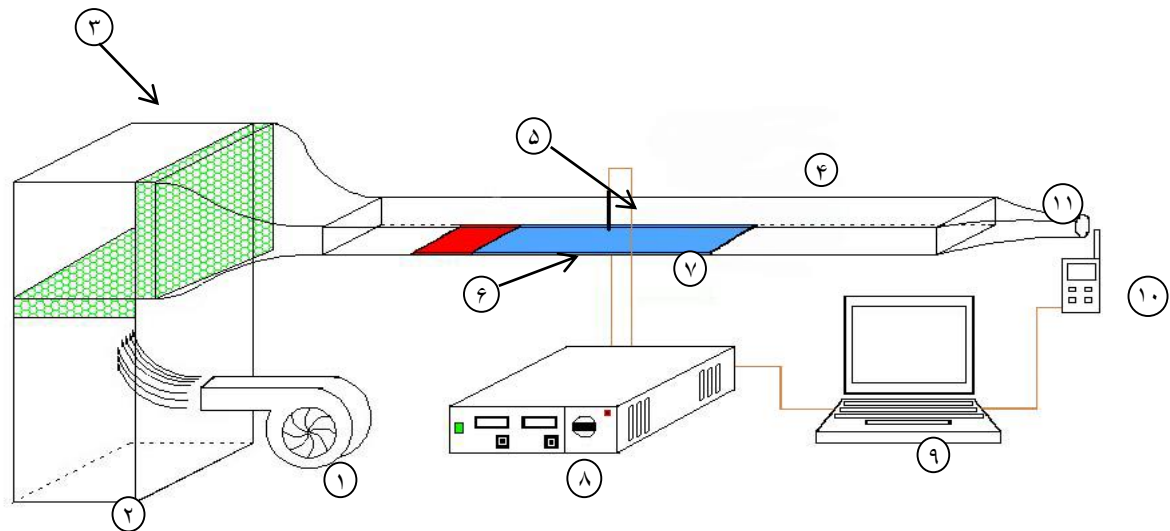
۳- دستگاه آزمایش و روند انجام آزمایش‌ها

اجزای دستگاه اصلی آزمایش شکل (۲) شامل منبع تغذیه با قابلیت تنظیم ولتاژ، دماسنج-رطوبت‌سنج دیجیتال، سرعت‌سنج دیجیتال مجهز به پراب پروانه‌ای، جعبه هوا، فن دمنده با قابلیت تنظیم میزان هوای خروجی است [۲۷].

به منظور هدایت جریان هوا بر روی سطح آب، از اتاقک تست به شکل مکعب مستطیل و از جنس پلکسی گلاس با ابعاد $۱۸۴ * ۲۰ * ۹٫۵$ سانتی‌متر استفاده شد و حوضچه آبی که سطح زیرین آن با صفحه مسی پوشانده شده در کف آن قرار داده شده است.

صفحه مسی به عنوان یکی از الکترودها به کار می‌رود که لایه آب به ضخامت ۱ cm روی آن را می‌پوشاند و الکترود دیگر یک سوزن به قطر ۱ mm از جنس فولاد زنگ‌نزن (با روکش مسی) می‌باشد که به طور عمود بر صفحه مسی در بالای سطح آب با قابلیت تنظیم ارتفاع در فواصل الکترودی ۲، ۳ و ۴ cm قرار می‌گیرد. هوای محیط توسط فن به درون جعبه هوا هدایت می‌شود. به منظور به حداقل رساندن اغتشاشات، در داخل جعبه هوا دو سری صفحات لانه زنبوری تعبیه گردیده است. جریان هوا در سرعت‌های $۰٫۲۵$ ، $۱٫۰۰$ و $۱٫۷۵\text{ m/s}$ پس از عبور از جعبه هوا با سرعت یکنواخت وارد تونل می‌شود و با گذشتن از روی سطح آب از انتهای دیگر آن خارج می‌شود. به منظور افزایش دقت در اندازه‌گیری سرعت هوا، درون تونل از کانالی همگرا که مقطع خروجی آن قطری برابر قطر پراب پروانه‌ای (۶ cm) دارد استفاده شده است.

پیکربندی الکترودهای مورد استفاده در این تحقیق سوزن و صفحه می‌باشند. الکترود صفحه‌ای با ضخامت $۰٫۲\text{ mm}$ و ابعاد $۲۰\text{ cm} \times ۷۰\text{ cm}$ در کف مخزن آب قرار گرفته و اتصال الکتریکی زمین به آن با ایجاد سوراخی در کف کانال و عبور سیم انجام شد. لبه‌های الکترود صفحه‌ای با نواری عایق پوشانده شدند چراکه لبه‌های تیز مرکز تجمع بار بوده، موجب تقویت میدان الکتریکی به صورت موضعی می‌شوند.



شکل ۲- نمایی از دستگاه آزمایشگاهی ۱- فن ۲- جعبه هوا ۳- صفحات لانه زنبوری ۴- اتاقک تست الکترو سوزنی ۵- الکترو سوزنی ۶- الکترو سوزنی صفحه‌ای ۷- ظرف آب ۸- منبع تغذیه ۹- کامپیوتر ۱۰- دماسنج-رطوبت سنج دیجیتال ۱۱- شیپوره همگرا

الکترودهای سوزنی مورد استفاده دارای قطر ۱mm با طول ۱۳cm هستند. برای اختلاط و یکنواخت شدن رطوبت هوا در خروجی از یک اوریفیس چوبی با سوراخی بیضوی با قطرهای ۳/۵cm و ۶cm استفاده شده است. اوریفیس در داخل کانال و به فاصله ۲۰cm از خروجی و ۳۵cm از حوضچه آب قرار گرفته است. رطوبت جریان هوا پس از عبور از اوریفیس با دقت بسیار خوبی همگن گردید. به منظور اعمال میدان الکتریکی و اندازه‌گیری جریان و ولتاژ از یک منبع تغذیه ولتاژ بالا با حداکثر توان خروجی ۲۰۰W ساخت شرکت Heinzinger مدل PCN 4000-5 استفاده شد. حداکثر ولتاژ و جریان خروجی از دستگاه به ترتیب ۴۰kV و ۵mA است. برای اندازه‌گیری سرعت هوا در خروجی تونل باد از یک سرعت سنج دیجیتال (Testo 435) استفاده می‌شود. اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی در ورودی و خروجی کانال توسط یک دماسنج- رطوبت سنج دیجیتال با قابلیت اتصال به کامپیوتر (Testo-177H1) انجام می‌گیرد. در ابتدا و قبل از شروع آزمایش ظرف آب تا ارتفاع ۱cm از آب پر شده، سپس دمنده روشن می‌شود. دماسنج دیجیتال در ورودی کانال قرار می‌گیرد. ابتدا ولتاژ و جریان نمایان شده بر روی نمایشگرها صفر می‌باشند. ولتاژ افزایش داده می‌شود تا نمایشگر جریان عدد ۰/۰۱mA (حداقل جریان قابل اندازه‌گیری) را نشان دهد. پس از ثابت شدن جریان و ولتاژ مقادیر رطوبت نسبی و دما در ورودی و خروجی کانال اندازه‌گیری شده و به همراه مقادیر ولتاژ و جریان ثبت می‌شوند. در این آزمایشها که با الکترو سوزنی انجام می‌شود، جریان تولیدی بسیار مهم است و لذا برای دقت در آزمایشها جریان در ابتدا به گام ۰/۰۱ mA افزایش داده می‌شود وقتی ولتاژ به اندازه کافی بالا رفت جریان را با گام ۰/۰۲ بالا افزایش داده می‌شود. افزایش ولتاژ تا زمانی که تخلیه الکتریکی بین دو الکتروود یا همان ولتاژ شکست صورت گیرد ادامه می‌یابد.

۴- روابط حاکم و معادلات

با معلوم بودن دما و رطوبت نسبی در ورودی و خروجی تونل باد، مقادیر رطوبت مخصوص در این مقاطع قابل محاسبه است.

$$\omega = 0.662 \frac{\phi.P_g}{P - \phi.P_g} \quad (5)$$

ϕ بیانگر رطوبت نسبی است که با رطوبت سنج دیجیتال سنجیده می‌شود. P فشار اتمسفریک و P_g فشار بخار اشباع است.

میزان نرخ تبخیر بر مبنای تغییرات رطوبت مخصوص در ورودی و خروجی کانال با رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$\dot{m}_{eva} (\text{kg}_w / \text{s}) = \dot{m}_{dryair} \times (\omega_2 - \omega_1) \quad (6)$$

با معلوم بودن مقادیر سرعت و مساحت مقطع کانال، دبی جرمی هوای ورودی به کانال برابر است با:

$$\dot{m}_{dryair} (\text{kg}_a / \text{s}) = \rho_{dryair} \times U \times A \quad (7)$$

به منظور ارائه نتایج به صورت جامع از عدد بی بعد شروود استفاده شده است. عدد شروود در انتقال جرم معادل عدد ناسلت در انتقال حرارت است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Sh = \frac{h_m . D_L}{D_f} = \left(\frac{\dot{m}_{eva}}{A . \Delta C} \right) \frac{D_L}{D_f} \quad (8)$$

D_L طول مشخصه (طول ظرف)، A مساحت مقطع کانال، D_f ضریب پخش مولکول‌های آب در هوا است. ضریب پخش مولکول‌های آب در هوا به صورت تابعی از دما و فشار توسط رابطه زیر ارائه می‌شود [۲۸].

$$D_f (m^2 / s) = 2.26 \times 10^{-5} \left(\frac{101325}{P} \right) \left(\frac{T}{273.15} \right) \quad (9)$$

از آنجا که پخش بخار آب از لایه اشباع روی سطح آب به درون توده هوا صورت می‌گیرد بهتر است دمای T در رابطه فوق برابر میانگین دمای حباب تر و دمای توده هوای بالای سطح در نظر گرفته شود:

$$T (K) = \left[\frac{WBT + \left(\frac{DBT_1 + DBT_2}{2} \right)}{2} \right] + 273.15 \quad (10)$$

نتایج را نیز می‌توان بر حسب عدد بی‌بعد الکترو هیدرودینامیک ارائه کرد. عدد الکترو هیدرودینامیک به صورت سرعت باد یونی (U_e) به سرعت جریان هوای محوری (U) تعریف می‌شود.

$$N_{EHD} = \frac{U_e}{U} = \frac{\sqrt{IL}}{\rho_{hu} A_e b} \quad (11)$$

در این رابطه I ، L ، ρ_{hu} و b به ترتیب بیانگر شدت جریان بین دو الکتروود، فاصله بین الکتروودها، چگالی هوای مرطوب و قابلیت تحرک یونی می‌باشد.

توان الکتریکی مصرفی به صورت حاصلضرب ولتاژ اعمالی در شدت جریان بین دو الکتروود بدست می‌آید.

$$Power = V \times I \quad (12)$$

عدد رینولدز الکتروودیدرودینامیک به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$Re_{EHD} = \frac{U_e d}{\nu} = \left[\frac{IL}{\rho_{hu} A_e b} \right] \frac{d}{\nu} \quad (13)$$

در رابطه فوق U و d به ترتیب معرف ویسکوزیته سینماتیکی سیال و قطر الکتروود سوزنی هستند. کارایی روش الکتروودیدرودینامیک به صورت نسبت گرمای لازم برای تبخیر آب به انرژی الکتریکی مصرف شده تعریف می‌شود.

$$P_e = \frac{(\dot{m} - \dot{m}_o) \cdot h_{fg}}{VI} \quad (14)$$

در رابطه فوق h_{fg} گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد. در آخر هم برای تعیین دقت روابط داده شده از داده های آزمایشگاهی از خط رگرسیون متناسب با داده ها استفاده و بصورت زیر تعریف می‌شود.

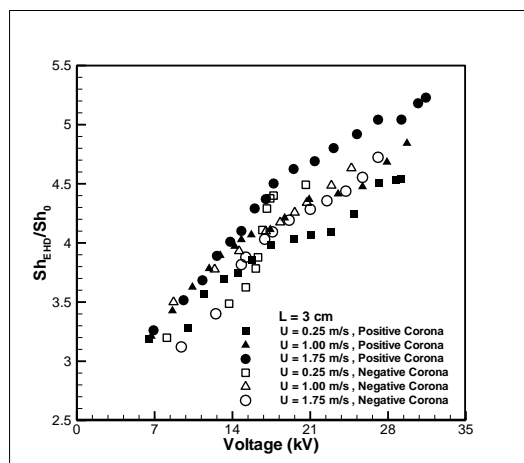
$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (15)$$

۵- نتایج آزمایشگاهی

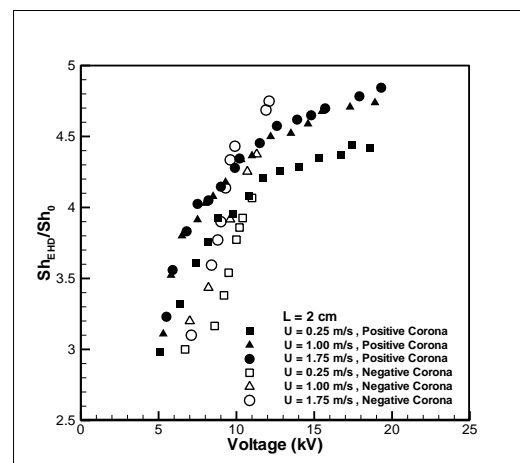
به منظور ارائه نتایج و تعیین میزان نسبت تبخیر از نسبت اعداد بدون بعد شروود به صورت Sh / Sh_0 استفاده می‌شود. عدد Sh بیانگر میزان تبخیر در حضور همزمان میدان الکتریکی و جریان هوای محوری است و Sh_0 بیانگر میزان تبخیر تنها با اعمال جریان هوای محوری (بدون اعمال میدان الکتریکی) در شروع هر آزمایش می‌باشد. بدین ترتیب تاثیر شرایط محیطی بر روی نرخ تبخیر به حداقل می‌رسد و عدد Sh / Sh_0 به عنوان مبنایی مناسب برای مقایسه نتایج در شرایط مختلف به کار می‌رود.

در شکل (۳) تغییرات بهبود نسبت تبخیر بر حسب ولتاژ در تخلیه کرونای مثبت و کرونای منفی از الکتروود سوزنی به قطر ۱mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s و فواصل الکتروودی ۲، ۳ و ۴cm آورده شده است. با افزایش ولتاژ بر میزان نسبت تبخیر افزوده می‌شود. با افزایش فاصله بین الکتروودها در کرونای مثبت و کرونای منفی منجر به افزایش ولتاژ شکست و افزایش نسبت تبخیر در ولتاژ شکست می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در کرونای مثبت نسبت به کرونای منفی افزایش نسبت تبخیر بالاتری دارد.

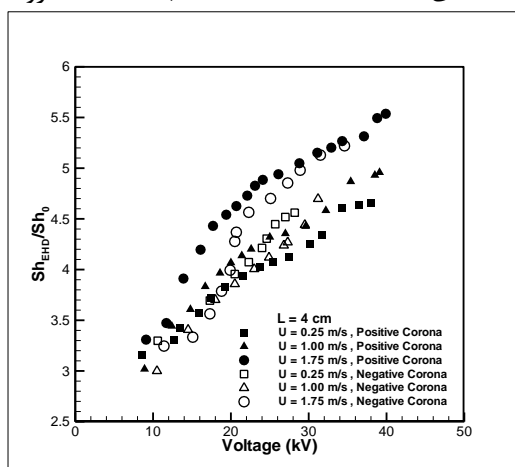
به عنوان نمونه با تغییر کرونای منفی به کرونای مثبت در سرعت هوای محوری ۰٫۲۵ m/s با فاصله الکتروودی ۲ cm در ولتاژ شکست کرونا، نسبت تبخیر از ۴٫۰۶ به ۴٫۴۱ افزایش می‌یابد.



ب) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۳ cm



الف) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۲ cm



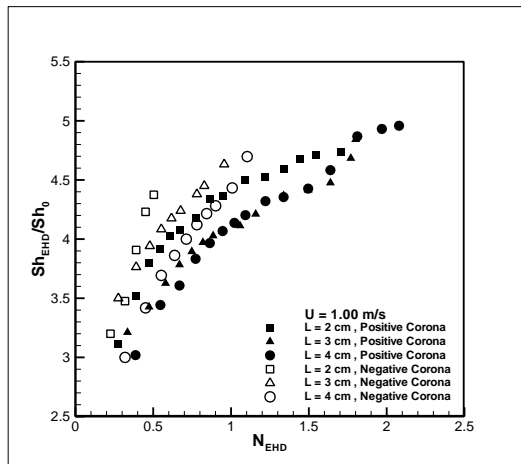
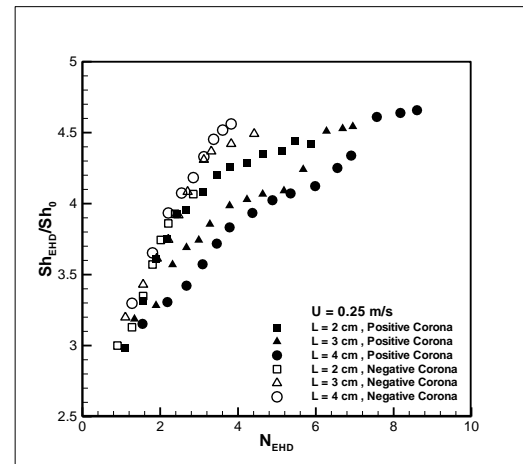
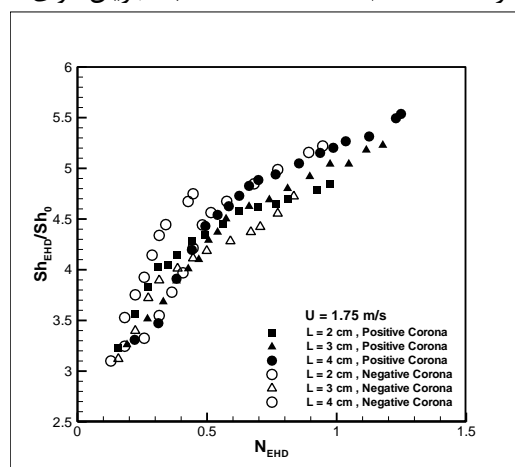
پ) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۴ cm

شکل ۳- تغییرات نسبت تبخیر بر حسب ولتاژ با تخلیه کرونای مثبت و منفی در سرعت های

جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت

همانطور که مشاهده می‌شود کرونای مثبت نسبت تبخیر بیشتری را در فواصل الکترودی مختلف نشان می‌دهد دلیل این پدیده می‌توان به اختلاف مکانیزم کرونای مثبت و منفی اشاره نمود. در ولتاژ یکسان، میزان جریان الکتریکی ایجاد شده در کرونای مثبت بیشتر از کرونای منفی است. افزایش شدت جریان الکتریکی و افزایش قابلیت تحرک یونی هر دو از عواملی هستند که موجب افزایش سرعت باد یونی می‌شوند. عامل دیگری که بایستی به آن اشاره نمود دور شدن و پخش سریع الکترون‌های سبک و کوچک از اطراف الکترود سوزنی با پلاریته منفی می‌باشد. بیشترین مقدار نسبت تبخیر در کرونای مثبت در فاصله الکترودی ۴cm در سرعت هوای محوری ۱٫۷۵ m/s را به میزان ۵٫۵۳ به دست آمد.

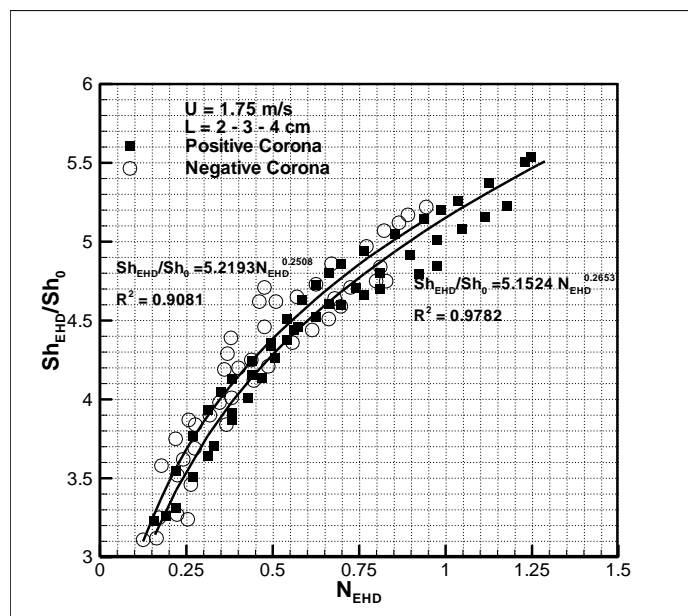
در شکل (۴) نمودارهای تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکترویدرودینامیک برای کرونای مثبت و منفی در فواصل الکترودی و سرعت‌های جریان هوای محوری متفاوت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی فواصل الکترودی روند تغییرات نسبت تبخیر تقریباً مشابه می‌باشد و این نتیجه تائیدی بر تاثیر غالب وزش باد یونی (نیروی کولمب) در افزایش نرخ تبخیر در اثر اعمال میدان الکتریکی است.

ب) جریان هوای محوری با سرعت 1.00 m/s الف) جریان هوای محوری با سرعت 0.25 m/s پ) جریان هوای محوری با سرعت 1.75 m/s

شکل ۴- تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروویدرودینامیک با تخلیه کرونای مثبت و منفی با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های 0.25 ، 1.00 و 1.75 m/s و فواصل الکتروودی متفاوت

در سرعت‌های مختلف هوای محوری تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروویدرودینامیک روندی به صورت زیر را دنبال می‌کند ولی با تغییر پلاریته الکتروود سوزنی، میزان تبخیر تغییر می‌کند. تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروویدرودینامیک در شکل (۵) برای یک سرعت هوای محوری با فواصل الکتروودی ۲ تا ۴ cm در کرونای مثبت و کرونای منفی آورده شده است. نتیجه قابل توجهی که می‌توان با توجه به این نمودارها به دست آورد نزدیکی مقادیر بهبود تبخیر در فواصل الکتروودی مختلف می‌باشد.

به عبارت دیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که تشدید تبخیر بر حسب عدد الکتروویدرودینامیک در سرعت‌های برابر و مستقل از سرعت جریان هوای محوری می‌باشد. با برآش داده‌های تجربی و عبور منحنی از میان آنها رابطه‌ای جهت محاسبه میزان نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروویدرودینامیک به دست می‌آید.



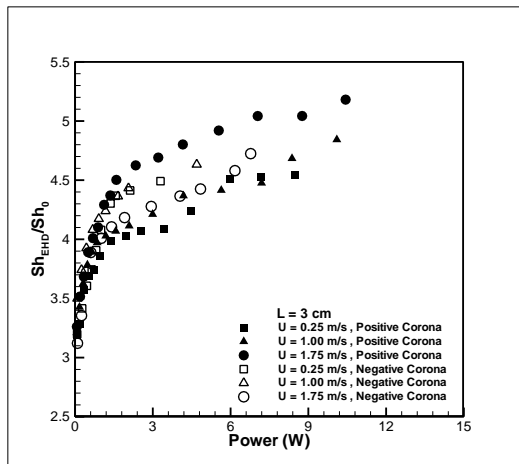
شکل ۵ - نسبت تبخیر در کرونای منفی با استفاده از الکتروود سوزنی به قطر ۱ mm

در جدول (۱) روابطی برای هر سه فاصله الکتروودی در سرعت‌های حضور کرونای مثبت و منفی ارائه شده است که در شرایط محیطی $\phi = 16/4 \sim 20/2$ و $T = 20/1 \sim 22/3$ °C به دست آمده است.

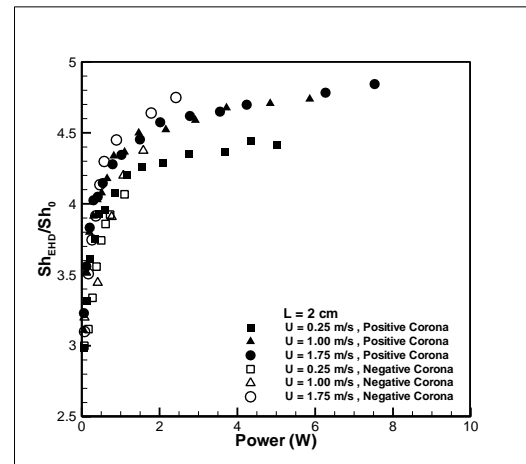
جدول ۱- روابط ارائه شده برای تک الکتروود سوزنی با قطر ۱mm با فواصل الکتروودی مختلف در جریان هوای محوری متفاوت با حضور کرونای مثبت و منفی

سرعت هوای محوری (m/s)	رابطه	پلاریته	
۰٫۲۵	$Sh/Sh_0 = 3.1041 N_{EHD}^{0.2023}$	مثبت	(۱۶)
	$Sh/Sh_0 = 3.0011 N_{EHD}^{0.3114}$	منفی	(۱۷)
۱٫۰۰	$Sh/Sh_0 = 4.1871 N_{EHD}^{0.2311}$	مثبت	(۱۸)
	$Sh/Sh_0 = 4.4681 N_{EHD}^{0.3346}$	منفی	(۱۹)
۱٫۷۵	$Sh/Sh_0 = 5.1524 N_{EHD}^{0.2653}$	مثبت	(۲۰)
	$Sh/Sh_0 = 5.2193 N_{EHD}^{0.2508}$	منفی	(۲۱)

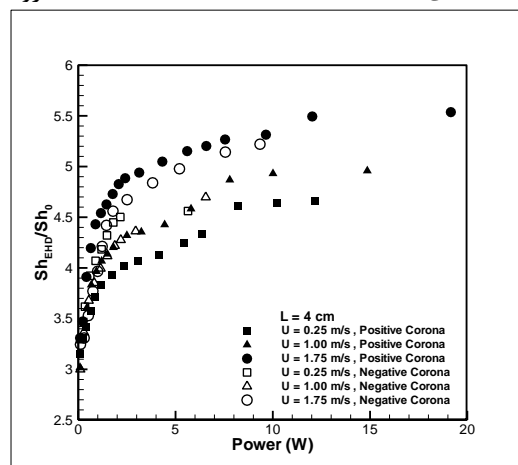
این روابط برای تمام فواصل الکتروود سوزنی (۲-۴ cm) در یک سرعت هوای محوری مشخص قابل استفاده می‌باشد. در شکل (۶) نسبت تبخیر بر حسب توان الکتریکی مصرفی در تخلیه کرونای مثبت و منفی از الکتروود سوزنی به قطر ۱ mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s و فواصل الکتروودی ۲، ۳ و ۴ cm آورده شده است. با افزایش توان الکتریکی مصرفی نسبت تبخیر در ابتدا با شیب تندی افزایش می‌یابد ولی با افزایش بیشتر توان به تدریج از شیب آن کاسته می‌شود و روند افزایشی بهبود با سرعت کمتری ادامه می‌یابد.



ب) فاصله الکتروود سوزنی و صفحه‌ای ۳ cm



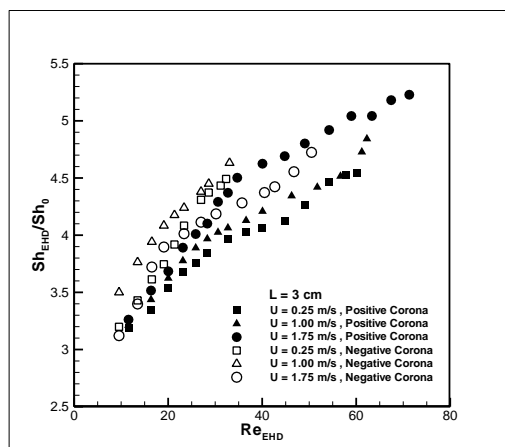
الف) فاصله الکتروود سوزنی و صفحه‌ای ۲ cm



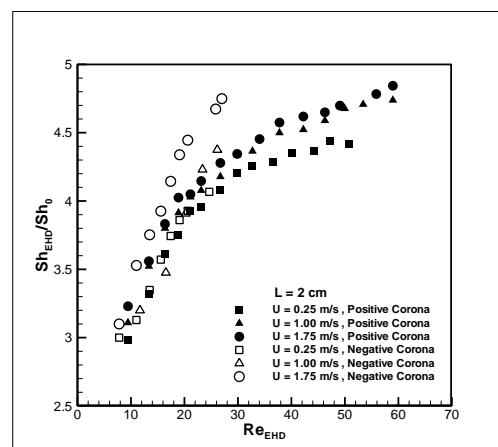
پ) فاصله الکتروود سوزنی و صفحه‌ای ۴ cm

شکل ۶- نسبت تبخیر بر حسب توان الکتریکی مصرفی با تخلیه کرونای منفی در سرعت‌های جریان هوای محوری و فواصل الکتروودی متفاوت

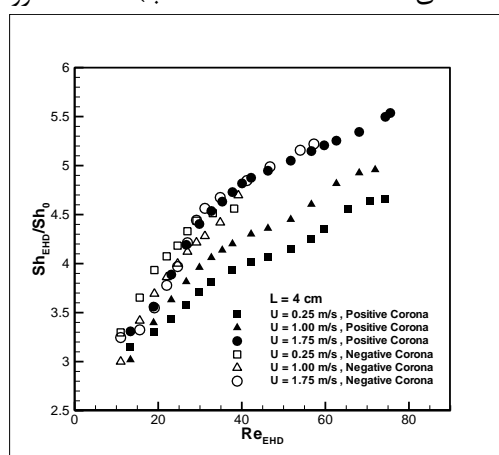
روند افزایش نسبت تبخیر با اعمال کرونای منفی نیز مشابه کرونای مثبت می‌باشد با این تفاوت که به دلیل قابلیت کرونای منفی در کاهش ولتاژ می‌توان به توان‌های الکتریکی پایین دست یافت که به ازای توان الکتریکی برابر در سرعت هوای محوری کم، کرونای منفی بهبود بیشتری را نسبت به کرونای مثبت نشان می‌دهد. ولی با افزایش سرعت هوای محوری این برتری به تدریج مغلوب می‌شود به نحوی که در فاصله الکتروودی ۴ cm، کرونای مثبت بهبود بیشتری را نسبت به کرونای منفی نشان می‌دهد. به عنوان نمونه با تغییر کرونای مثبت به کرونای منفی در سرعت هوای محوری ۰٫۲۵ m/s با فاصله الکتروودی ۲ cm در ولتاژ شکست کرونا میزان مصرف انرژی از ۵٫۰۲ تا ۱٫۲۰ W کاهش می‌یابد و همچنین مشاهده می‌شود که نسبت بهبود تبخیر در یک توان مصرفی مشخص در فواصل الکتروودی مختلف نزدیک به هم است. لازم به یادآوری می‌باشد که در ولتاژ یکسان، کاهش فاصله الکتروودها منجر به افزایش جریان الکتریکی و نسبت تبخیر می‌گردد. حال اگر V و I طوری تغییر کنند که حاصلضرب $V \times I$ ثابت بماند نسبت تبخیر نیز ثابت می‌ماند.



ب) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۳ cm



الف) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۲ cm



پ) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۴ cm

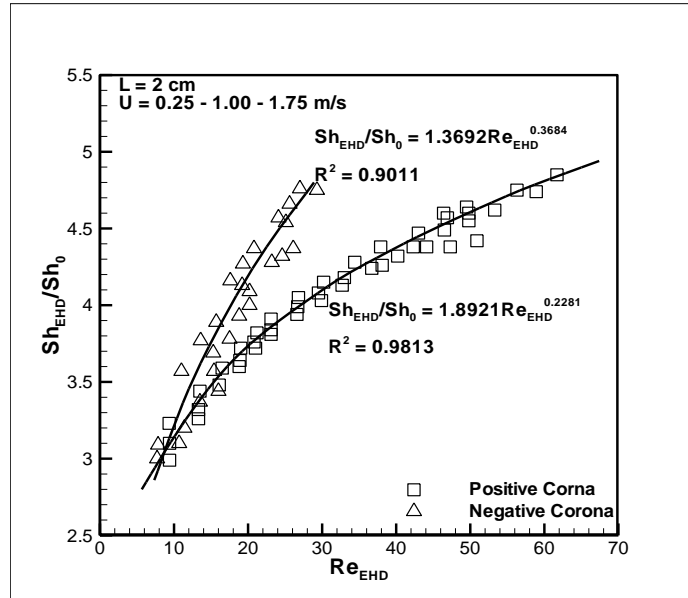
شکل ۷- تغییرات نسبت بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک با تخلیه کرونای مثبت و منفی

در سرعت‌های جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت

در شکل (۷) نمودارهای تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک برای کرونای مثبت و منفی از الکترود سوزنی به قطر ۱ mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰، و ۱٫۷۵ m/s و فواصل الکترودی ۲، ۳، و ۴ cm آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مطابق انتظار با افزایش فواصل الکترودی و نیز با بالا رفتن شدت جریان که منجر به افزایش عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک می‌شود. نسبت تبخیر بیشتر می‌شود و این نتیجه نیز تأییدی بر تاثیر غالب وزش باد یونی (نیروی کولمب) در یک فاصله الکترودی ثابت در افزایش نرخ تبخیر با اعمال میدان الکتریکی می‌باشد.

در شکل (۷) مقایسه‌ای بین سرعت‌های هوای محوری در کرونای مثبت و منفی با الکترود سوزنی به قطر ۱ mm صورت گرفته است. در یک سرعت هوای محوری و فاصله الکترودی مشخص دارای باد یونی معینی هست، که به دلیل تغییر فاصله الکترودی و یا تغییر سرعت هوای محوری، تغییرات در میدان الکتریکی صورت می‌پذیرد، مشاهده می‌شود که با بالا رفتن عدد رینولدز میزان نسبت تبخیر تغییر کرده است. در سرعت‌های ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s هوای محوری تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک روندی به صورت زیر را دنبال می‌کنند. تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک برای کرونای مثبت و

منفی در فاصله الکتروودی ۲cm و جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰/۲۵ تا ۱/۷۵ m/s در شکل (۸) آورده شده‌اند. نتیجه قابل توجهی که می‌توان با توجه به این نمودار به دست آورد نزدیکی مقادیر نسبت تبخیر در فواصل مختلف الکتروودی می‌باشد. با برازش داده‌های تجربی و عبور منحنی از میان آنها رابطه‌ای جهت محاسبه نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروویدرودینامیک به دست می‌آید.



شکل ۸- نسبت تبخیر با استفاده از الکتروود سوزنی به قطر ۱ mm برای فاصله الکتروودی ۲cm

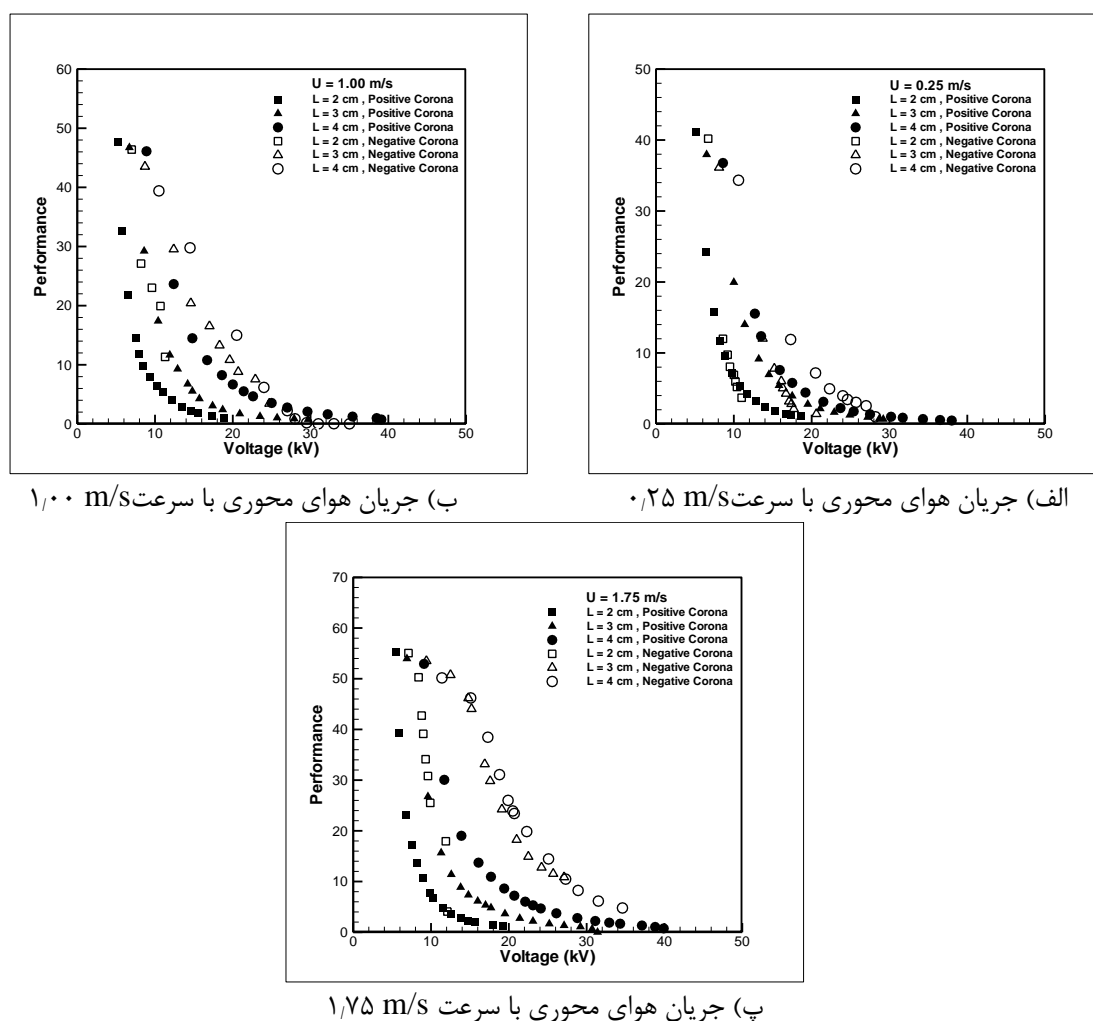
جدول ۲- روابط ارائه شده برای تک الکتروود سوزنی با قطر ۱mm با اعمال جریان هوای محوری در فواصل الکتروودی

متفاوت با حضور کرونای مثبت و منفی

فاصله الکتروود سوزنی و صفحه‌ای (cm)	رابطه	پلاریته	
۲	$Sh/Sh_0 = 1.8921 Re_{EHD}^{0.2281}$	مثبت	(۲۲)
	$Sh/Sh_0 = 1.3692 Re_{EHD}^{0.3684}$	منفی	(۲۳)
۳	$Sh/Sh_0 = 17942 Re_{EHD}^{0.2493}$	مثبت	(۲۴)
	$Sh/Sh_0 = 1.9932 Re_{EHD}^{0.3124}$	منفی	(۲۵)
۴	$Sh/Sh_0 = 1.6641 Re_{EHD}^{0.2753}$	مثبت	(۲۶)
	$Sh/Sh_0 = 1.4783 Re_{EHD}^{0.3161}$	منفی	(۲۷)

در جدول (۲) روابطی برای هر سه فاصله الکتروودی در حضور کرونای مثبت و منفی ارائه شده است که در شرایط محیطی $\phi = 16/4 \sim 20/2$ و $T = 20/1 \sim 22/3$ °C به دست آمده است. هر یک از این روابط برای تمام سرعت‌های هوای محوری قابل استفاده می‌باشد.

در شکل (۹) نمودارهای تغییرات کارایی بر حسب ولتاژ برای کروناهای مثبت و منفی با الکتروود سوزنی به قطر ۱ با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s و فواصل الکتروودی ۲، ۳ و ۴ cm آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی نمودارها میزان کارایی روش الکترووهیدرودینامیک در ابتدا با شیب تندی کاهش می‌یابد و سپس از سرعت کاهش آن کاسته می‌شود. می‌توان بیان کرد که مصرف انرژی الکتریکی در ولتاژ آستانه که منجر به تولید باد یونی می‌گردد بسیار کم و در حدود ۰٫۱۰۵ تا ۰٫۱۰۹ W در محدوده فواصل الکتروودی ۲ تا ۴ cm می‌باشد. عامل اصلی بالاتر بودن قابل توجه کارایی در ولتاژهای اولیه، مصرف بسیار کم انرژی در شروع می‌باشد.



شکل ۹- تغییرات کارایی بر حسب ولتاژ با تخلیه کروناهای مثبت و منفی در سرعت‌های جریان هوای محوری و فواصل الکتروودی متفاوت

شکل (۹) تغییرات کارایی در کروناهای مثبت و منفی بر حسب ولتاژ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در ولتاژهای اولیه افزایش تبخیر با شیب تندی صورت می‌گیرد ولی با افزایش بیشتر ولتاژ از روند افزایشی آن کاسته می‌شود در حالی که با افزایش ولتاژ، توان مصرفی با شیب تندتری افزایش می‌یابد. در مجموع افزایش تاثیر اغتشاشات در افزایش تبخیر با افزایش ولتاژ و همچنین افزایش توان الکتریکی

مصرفی دلایل کاهش کارایی با افزایش ولتاژ می‌باشند. نکته قابل توجه دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد در ولتاژ یکسان، افزایش فواصل الکتروودی موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود ولی افزایش فاصله موجب کاهش جریان الکتریکی و توان مصرفی نیز می‌گردد. بدین ترتیب افزایش فاصله الکتروودها اگرچه موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود ولی کاهش بیشتر انرژی الکتریکی مصرفی موجب افزایش کارایی در فواصل الکتروودی بیشتر می‌گردد.

شکل (۱۰) کارایی کروناي مثبت و منفی را با استفاده از الکتروود سوزنی به قطر ۱mm در جریان هوای محوری با سرعت‌های بالاتر از ۱٫۰ m/s نشان می‌دهد. به کمک برازش داده‌های تجربی رابطه‌ای جهت محاسبه کارایی روش الکتروودینامیک بر حسب سرعت باد یونی و سرعت جریان هوای محوری برای هر دو کروناي مثبت و منفی به دست آورده شده است.

$$P_e = \frac{7.1427}{(U_e^{2.055} \times U^{0.5})} \quad 1.00m/s \leq U < 1.75 m/s \quad (28)$$

کروناي مثبت

$$P_e = \frac{24.5731}{(U_e^{0.8811} \times U^{0.5})} \quad 1.00m/s \leq U < 1.75 m/s \quad (29)$$

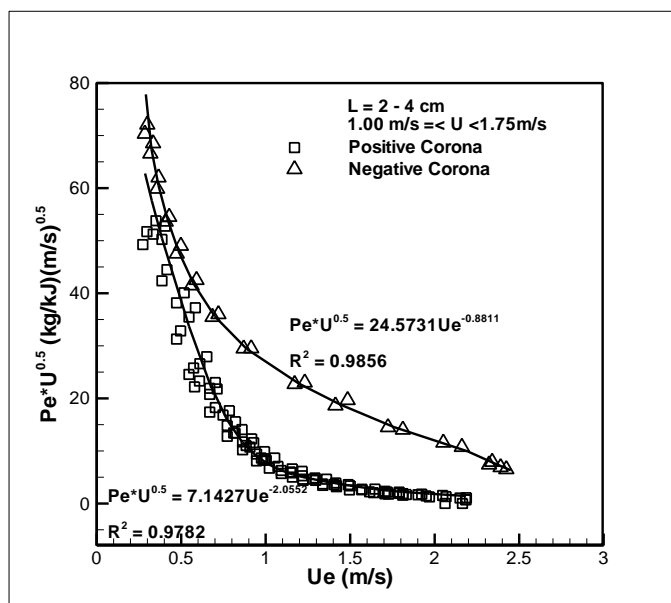
کروناي منفی

با توجه به رابطه به دست آمده این رابطه برای تمامی فواصل الکتروودی مورد آزمایش و جریان‌های هوای محوری با سرعت‌های ۱٫۰ تا ۱٫۷۵ m/s معتبر می‌باشد.

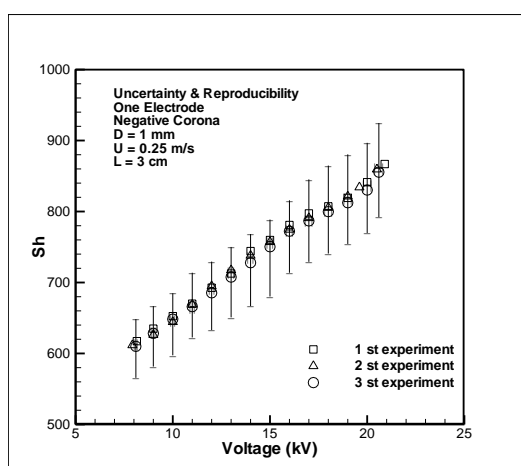
۶- تحلیل عدم قطعیت^۱

با توجه به اینکه نتایج اصلی در بررسی افزایش نرخ تبخیر در حضور میدان الکتریکی بر حسب عدد شروود بیان شده‌اند به بررسی عدم قطعیت عدد شروود می‌پردازیم. برای محاسبه عدم قطعیت عدد شروود کافی است مقادیر عدم قطعیت‌های سرعت هوا به میزان ۱٪، دمای هوا به میزان $0.2^\circ C \pm$ ، رطوبت نسبی هوا به میزان ۱٪، خطای اندازه‌گیری شدت جریان الکتریکی به میزان ۱٪ و ولتاژ به میزان ۱٪ خوانده شده و در محاسبات لحاظ می‌شود. در شکل (۱۱) تحلیل عدم قطعیت و تکرار پذیری برای عدد شروود در سرعت هوای ۰٫۲۵ m/s و فاصله الکتروودی ۳ cm نشان داده است. حداقل و حداکثر عدم قطعیت محاسبه شده به ترتیب برای کروناي مثبت برابر ۴٫۱٪ و ۸٪ و کروناي منفی برابر ۳٫۴٪ و ۷٫۹٪ می‌باشند. چنانچه در نمودار مشاهده می‌شود تمامی داده‌ها در محدوده عدم قطعیت محاسبه شده قرار گرفته‌اند. علت افزایش پراکندگی بیشتر داده‌ها با افزایش ولتاژ نزدیک شدن به ولتاژ شکست می‌باشد.

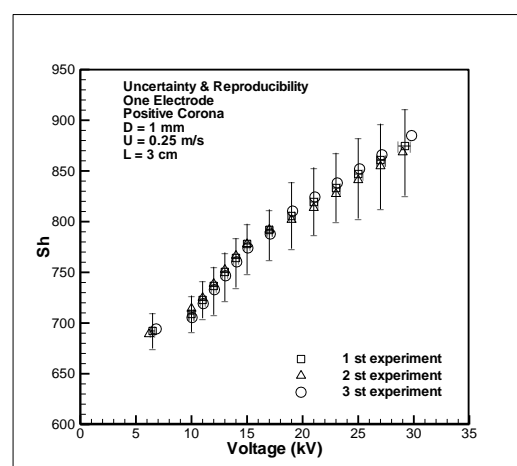
¹ Uncertainty



شکل ۱۰- تغییرات کارایی کرونی مثبت و منفی بر حسب باد یونی برای سرعت‌های هوای ۱/۰۰ و ۱/۷۵ m/s



ب) تخلیه کرونی منفی



الف) تخلیه کرونی مثبت

شکل ۱۱- بررسی عدم قطعیت و تکرار پذیری مقادیر عدد شرود برای آزمایش‌های انجام شده

۷- نتیجه‌گیری

اعمال کرونی مثبت به علت ایجاد جریان الکتریکی بیشتر نسبت به کرونی منفی بهبود نسبی را در ولتاژ ثابت به دنبال دارد و لذا در فواصل الکترودی ۳ و ۴ cm کرونی مثبت نسبت به کرونی منفی برتری می‌یابد. افزایش فاصله الکترودی در ولتاژ ثابت با کرونی منفی با کاهش جریان الکتریکی همراه بوده و موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود.

با افزایش سرعت جریان هوای محوری بر میزان تاثیر نسبی میدان الکتریکی بر تشدید تبخیر افزوده می‌شود به طوری که در نزدیکی ولتاژ شکست با افزایش سرعت هوا از ۰/۲۵ تا ۱/۷۵ m/s میزان نسبت تبخیر در کرونی مثبت تا ۱۸/۸۸٪ و کرونی منفی تا ۱۶/۷۶٪ افزایش می‌یابد.

استفاده از روش الکتروهیدرودینامیک با مصرف انرژی بسیار کم، افزایش قابل توجه تبخیر را به همراه دارد. به عنوان مثال با تغییر کرونا مثبت به کرونا منفی با سرعت هوای محوری 0.25 m/s و فاصله الکترودی 2 cm در ولتاژ شکست در حدود 356.71 درصد کاهش مصرف انرژی را در پی دارد. استفاده از کرونا مثبت نسبت به کرونا منفی به دلیل مصرف انرژی کمتر در آغاز کارایی بیشتری را نتیجه می‌دهد. نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک با فواصل الکترودی متفاوت در کرونا مثبت و منفی تقریباً یکسان می‌باشد که بیانگر تاثیر غالب باد یونی (نیروی کولمب) در نسبت تبخیر است. افزایش فاصله الکترودی در ولتاژ ثابت با کرونا مثبت یا کرونا منفی موجب پایین آمدن جریان الکتریکی و در نتیجه باعث پایین آمدن عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک می‌شود و لذا موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود.

مراجع

- [1] Kim, S.H., and Lee, K.W., "Experimental Study of Electrostatic Precipitator Performance and Comparison with Existing Theoretical Prediction Models", J. Electrostatics Vol. 48, pp. 3-25, (1999).
- [2] Leonard, G., Mitchener, M., and Self, S. A., "An Experimental Study of the Electrohydrodynamics Flow in an Electrostatic Precipitators", J. Fluid Mech. Vol. 127, pp. 123-140, (1983).
- [3] www.Siemens.com/Precipitator, (2008).
- [4] Laohalertdecha, S., Naphon, P., and Wongwises, S., "A Review of Electro Hydrodynamic Enhancement of Heat Transfer", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, pp. 858-876, (2007).
- [5] Brand, K., "Enhancement of External Condensation Heat Transfer with Electrohydrodynamic Induction Pumping", Mechanical Engineering Department, Texas A&M University, Ph.D. Thesis, (2002).
- [6] پناهی، م. و عالم‌رجبی، ع. " بررسی تجربی افزایش نسبت تبخیر آب با استفاده از الکتروود سوزنی به روش الکتروهیدرودینامیکی"، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران- سال سیزدهم، شماره اول، تابستان (۱۳۹۰).
- [7] Sadek, H., Robinson, A.J., Cotton, J.S., Ching, C.Y., and Shoukri, M., "Electrohydrodynamic Enhancement of In-tube Convective Condensation Heat Transfer", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1647-1657, (2006).
- [8] Butrymowicz, D., Trela, M., and Karwacki, J., "Enhancement of Condensation Heat Transfer by Means of EHD Condensate Drainage", Int. J. Therm. Sci., Vol. 41, pp. 646-657, (2002).
- [9] Bologna, M.K., Savin, I.K., and Didkovsky, A.B., "Electric-field-induced Enhancement of Vapor Condensation Heat Transfer in the Presence of a Non-condensable Gas", Int. J. Heat Mass Transfer, pp. 1558-1577, (1987).

- [10] Bologna, M.K., and Didkovskiy, A.B., "Enhancement of Heat Transfer in Film Condensation of Vapors of Dielectric Liquids by Superposition of Electric Fields", *Heat Transfer Soviet Res.*, Vol. 9, pp. 147–151, (1997).
- [11] Bologna, M.K., Savin, I.K., and Didkovsky, A.B., "Electric-field-induced Enhancement of Vapor Condensation Heat Transfer in the Presence of a Non-condensable Gas", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1577–1585, (1987).
- [12] Bologna, M. K., Sajin, T.M., Kozhukhar, L.A., Klimov, S.M., and Motorin, O.V., "The Influence of Electric Fields on Basic Processes Connected with Physical Phenomena in Two-phase Systems", *Int. Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid*, pp. 69–72, (1996).
- [13] Cheung, K., Ohadi, M.M., and Dessiatoun, S.V., "EHD-assisted External Condensation of R-134a on Smooth Horizontal and Vertical Tubes", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1747– 55, (1999).
- [14] Holmes, R.E., and Chapman, A.J., "Condensation of Freon-114 in the Presence of a Strong Nouniform Alternating Electric Field", *J. Heat Transfer*, pp. 616–20, (1970).
- [15] Wawzyniak, M., and Seyed-Yagoobi, J., "Experimental Study of Electrohydro Dynamically Augmented Condensation Heat Transfer on a Smooth and an Enhanced Tube", *J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 499–502, (1996).
- [16] Sunada, K., Yabe, A., Taketani, T., and Yoshizawa, Y., "Experimental Study of EHD Pseudo-drop Wise Condensation", *Proc. ASME/JSME Thermal Eng.*, Vol. 3, pp. 61–7, (1991).
- [17] Moreau, E., Leger, L., and Touchard, G., "Effect of a DC Surface-corona Discharge on a Flat Plate Boundary Layer for Air Flow Velocity Up to 25 m/s", *J. Electrostatics*, Vol. 64, pp. 215–225, (2006).
- [18] Leonard, G., Mitchener, M., and Self, S. A., "An Experimental Study of the Electrohydrodynamics Flow in an Electrostatic Precipitators", *J. Fluid Mech.* Vol. 127, pp. 123-140, (1983).
- [19] Alemrajabi, A., and Lai, F. C., "EHD-enhanced Drying of Partially Wetted Glass Beads", *Drying Technology*, Vol. 23, pp. 597–609, (2005).
- [20] Laohalertdecha, S., and Wongwises, S., "Effects of EHD on Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop During Two-phase Condensation of Pure R-134a at High Mass Flux in a Horizontal Micro-fin Tube", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 675–686, (2006).
- [21] Kalman, H., and Sher, E., "Enhancement of Heat Transfer by Means of a Corona Wind Created by a Wire Electrode and Confined Wings Assembly", *Appl. Thermal Eng.*, Vol. 21, pp. 265-282, (2001).

- [22] Kamkari, B., and Alemrajabi, A.A., "Investigation of Electrohydrodynamically Enhanced Convective Heat and Mass Transfer from Water Surface", *Int. J. Heat Transfer Engineering*, pp. 138–146, (2010).
- [23] Darabi, J., Ohadi, M.M., and Devoe, D., "An Electrohydrodynamic Polarization Micropump for Electronic Cooling", *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 10, pp. 98–106, (2001).
- [24] Barthakur, N.N., "Electrostatically Enhanced Evaporation Rates of Saline Water", *Desalination*, Vol. 74, pp. 339-353, (1989).
- [۲۵] پناهی، م.، " بررسی تجربی اثر شکل و هندسه الکتروود بر نرخ تبخیر آب به روش الکترووهیدرودینامیکی (EHD)", پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مکانیک، (۱۳۸۹).
- [26] Lai, F.C., and Sharma, R.K., "EHD-enhanced Drying with Multiple Needle Electrode", *J. Electrostatics*, Vol. 63, pp. 223–237, (2005).
- [27] Subir, R., "An Introduction to High Voltage Engineering", Prentice – Hall, New York, (2004)
- [28] Kuffel, E., Zaengl, W. S., and Kuffel, J., "High Voltage Engineering: Fundamentals", Newness, 2nd Edition, Published by Butterworth-Heinemann, (2000).
- [29] Kibler, K. G., and Carter, H. G., "Electrocooling of Gases", *J. Applied Physics*, Vol. 45, pp. 4436-4440, (1974).
- [30] Chaker, M., and Cyrus, B., "Inlet Fogging of Gas Turbine Engines-part I: Fog Droplet Thermodynamics, Heat Transfer, and Practical Considerations", *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 126, pp. 545-558, (2004).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A : سطح مقطع الکتروود صفحه ای (m^2)
- A_e : سطح مقطع تونل باد (m^2)
- b : قابلیت تحرک یونی ($1.43 \times 10^{-4} m^2 / V.s$)
- D_f : ضریب پخش جرمی مولکول های آب در هوا (m^2 / s)
- D_L : طول مشخصه (m)
- E : شدت میدان الکتریکی (V / m)
- F_e : نیروی حجمی الکترووهیدرودینامیکی (N / m^3)
- h_m : ضریب انتقال جرم (m / s)
- I : شدت جریان الکتریکی (A)

- L : فاصله الکتروودای (m)
- \dot{m}_{eva} : میزان آهنگ تبخیر آب با اعمال میدان الکتریکی و جریان هوای محوری (kg_w/s)
- \dot{m}_{eva0} : میزان آهنگ تبخیر آب تنها در حضور جریان هوای محوری (kg_w/s)
- $\dot{m}_{dry\ air}$: دبی جرمی هوای خشک (kg_a/s)
- P_a : فشار هوا (Pa)
- P_g : فشار بخار اشباع آب (Pa)
- Sh : عدد بی بعد شروود
- T : دمای میانگین هوا ($^{\circ}C$)
- U : سرعت جریان هوای محوری (m/s)
- U_e : سرعت باد یونی (m/s)
- V : پتانسیل الکتریکی (V)
- WBT : دمای حباب تر هوا ($^{\circ}C$)
- WBT : دمای حباب تر هوا ($^{\circ}C$)
- SSE : مجموع مجذور فاصله بین مقادیر واقعی
- SST : مجموع مجذور فاصله بین مقادیر واقعی و میانگین آنها
- ω : رطوبت مخصوص هوا (kg_w/kg_a)
- φ : رطوبت نسبی هوا (%)
- ϵ_0 : ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلاء (F/m)

زیر نویس ها

- 1 : مقطع ورودی تونل باد
- 2 : مقطع خروجی تونل باد
- 0 : مبنای سطح هوا بدون میدان الکتریکی

Abstract

Enhancement of forced flow evaporation rate by applying electric field (corona wind) has been experimentally evaluated in this study. Corona wind produced by a fine needle electrode which is charged with positive and negative high DC voltage impinges to water surface and leads to evaporation enhancement by disturbing the saturated air layer over water surface. The study is focused on the effect of corona wind velocity, electrode spacing and air flow velocity on the level of evaporation enhancement. Two sets of experiments, i.e. with and without electric field, have been conducted. Data obtained from the first experiment are used as reference for evaluation of evaporation enhancement at the presence of electric field. The results show that Maximum enhancement was 29.1154% for positive corona at air velocity of 1.75 m/s and electrode spacing of 3 cm, respectively the evaporation enhancement has been increases with change high DC voltage negative to positive and decreases whit increasing the electrode spacing at a fixed voltage.