

بررسی تجربی افزایش نسبت تبخیر آب با استفاده از

الکتروودینامیکی

در مقاله حاضر تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر سرعت جریان هوای محوری، فواصل الکتروودی، ولتاژ الکتریکی و شدت جریان الکتریکی بر نسبت تبخیر در حضور میدان الکتریکی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. آزمایش‌ها با پلاریته مثبت و فواصل الکتروودی ۲، ۳ و ۴ cm و با سرعت‌های ۰٫۲۵، ۱٫۰۰ و ۱٫۷۵ m/s انجام گرفتند. اعمال میدان الکتریکی بین الکتروودهای سوزنی و صفحه‌ای با تشکیل پلازما حول الکتروود 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. طبق نتایج به دست آمده با افزایش سرعت جریان هوای محوری از ۰٫۲۵ به ۱٫۷۵ m/s، در فاصله الکتروودی ثابت ۲ cm، ۱۸٫۸۸۶ 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.

مجتبی پناهی^۱

دانشجوی کارشناسی ارشد

علی اکبر عالم رجبی^۲

دانشیار

واژه های راهنما: الکتروودینامیک^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 تابشی هستند که به دلیل مصرف بالای انرژی بازده کمی دارند. یکی از روش‌های نوین در این

^۱ نویسنده مسئول، دانشجوی 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 Electrohydrodynamics

^۴ Corona Wind

زمینه استفاده از میدان الکتریکی قوی است. اعمال میدان الکتریکی قوی در هوای مجاور سطح موجب ایجاد باد یونی (جریان ثانویه) و بر هم 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].

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

اولین عبارت در سمت راست این رابطه نیروی حجمی الکتروفوریک 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 ($\nabla \epsilon$) 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 فازی و تشدید تبخیر نیروی کولمب نقش اصلی را ایفا می‌کند در حالی که سایر نیروها در جریان‌های دو فازی حایز اهمیت هستند. سادک [۶] برای جلوگیری از تجمع حباب گازهای غیر قابل چگالش در سطح مشترک بخار و مایع استفاده کرد. و همچنین باتری موز [۷]، 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 [۸-۱۴]. در پژوهش تجربی دیگر مورنو [۱۵] 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 [۱۶-۱۹]. در این زمینه می‌توان به پژوهش کامکاری و عالم رجیبی [۲۰] 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 الکتروودها موجب به تاخیر افتادن ولتاژ شروع کرونا و ولتاژ شکست می‌شود و از شدت جریان کرونای شکست کاسته می‌شود و همچنین در فواصل الکتروودی کمتر از ۵ cm به ازای مصرف توان الکتریکی یکسان، پلاریته منفی، افزایش تبخیر بیشتری را نسبت به پلاریته

مثبت نشان می دهد. و در پژوهشی دیگر دارابی [۲۱] که نسبت تبخیر تبخیر ۴ تا ۸/۵ برابری را برای آب به روش الکتروهیدرودینامیکی گزارش کرد. بارتاکور [۲۲] 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 و لای و شارما [۲۳] هم برای نسبت تبخیر تبخیر آب از ظرف حاوی گلوله‌های شیشه‌ای 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 محسوس گزارش نشد. در مقاله حاضر هدف بررسی تاثیر اعمال کرونا مثبت در سرعت‌های هوای محوری و همچنین در فواصل الکتروودی مختلف بر چگونگی نسبت تبخیر به روش الکتروهیدرودینامیک می باشد.

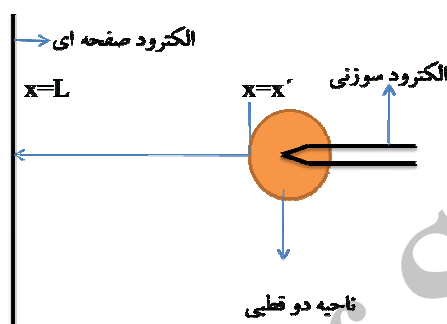
۲- باد کرونا

از آنجا که هدف اصلی در مقاله حاضر بررسی تاثیر اعمال باد کرونا مثبت در سرعت‌های مختلف هوای محوری بر میزان نسبت تبخیر است، در ادامه چگونگی تشکیل باد کرونا به اختصار شرح داده می شود. در الکتروسیسته، 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 مولکول‌های خنثای 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 کرونا 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. کرونا مثبت به همراه هاله‌ای 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 کرونا منفی است. تعداد الکترون‌ها در کرونا مثبت نسبت به کرونا منفی کمتر است ولی به دلیل حرکت الکترون‌ها به سمت الکتروود ظریف یعنی ناحیه با میدان الکتریکی قویتر، انرژی آنها بیشتر است [۲۴].

فرض می کنیم سوزن، قطب مثبت و صفحه، قطب منفی باشد (شکل ۱). در اطراف سوزن اولین یونیزاسیون به وجود می آید. الکترون‌های به وجود آمده سریعاً جذب آند (سوزن) می شوند در حالی که یون‌ها که از تحرک کمتری برخوردارند تقریباً در محل خود باقی می ماندند و در آنجا تجمعی نسبی از یون‌های

مثبت به وجود می‌آید. در نتیجه‌ی میدان حاصل از این بارها شدت میدان الکتریکی در اطراف سوزن کاهش می‌یابد، در حالی که شدت میدان الکتریکی در ناحیه‌ی وسط سوزن و صفحه بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر میدان الکتریکی یکنواخت‌تر می‌شود [۲۵]. ابتدا توزیع میدان الکتریکی (E) ناشی از حضور بارهای آزاد را در فضای بین دو الکترود به دست می‌آوریم [۲۶].

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



شکل ۱- نمایش ناحیه دو قطبی اطراف الکترود سوزنی

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

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

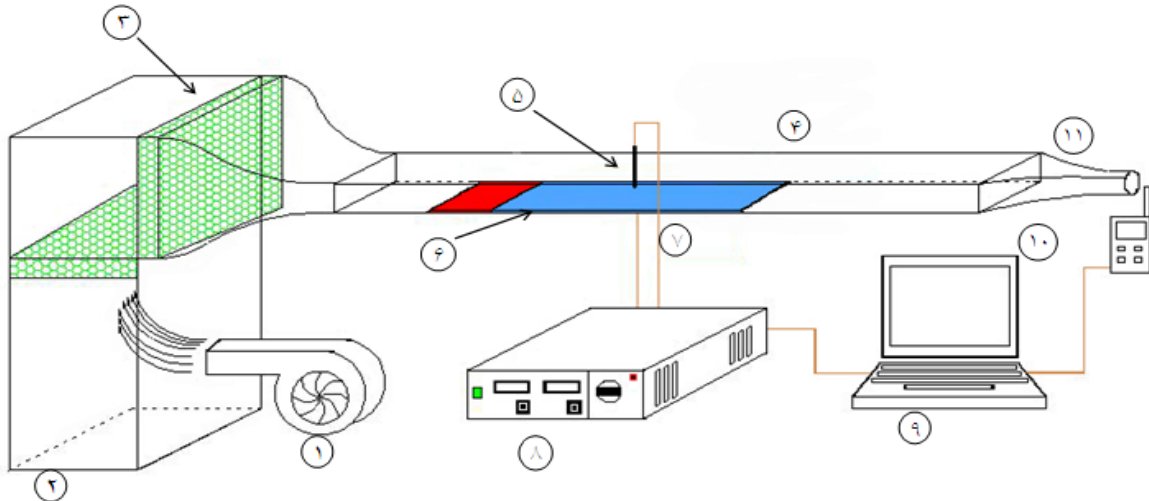
نهایتاً با جایگذاری رابطه (۲) در (۳) و صرف نظر کردن از x_0 در برابر L ، سرعت باد یونی بر حسب جریان الکتریکی به دست می‌آید.

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

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. [۲۷].

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].



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

به منظور هدایت جریان هوا بر روی سطح آب، از اتاقک تست به شکل مکعب مستطیل و از جنس پلکسی گلاس با ابعاد $184 \times 20 \times 9/5$ 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 الکترو دیگرمیک 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 $1/75$ 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 (۶cm) دارد استفاده شده است.

پیکربندی الکترودهای مورد استفاده در این تحقیق سوزن و صفحه می‌باشند. الکترو صفحه‌ای با ضخامت $0/2$ mm و ابعاد $20\text{ cm} \times 70\text{ cm}$ در کف مخزن آب قرار گرفته و اتصال الکتریکی زمین به آن با ایجاد سوراخی در کف کانال و عبور سیم انجام شد. لبه‌های الکترو صفحه‌ای با نواری عایق پوشانده شدند چراکه لبه‌های تیز مرکز تجمع بار بوده، موجب تقویت میدان الکتریکی به صورت موضعی می‌شوند. الکترودهای سوزنی مورد استفاده دارای قطر ۱ mm با طول ۱۳ cm هستند. برای اختلاط و یکنواخت شدن رطوبت هوا در خروجی از یک اوریفیس چوبی با سوراخی بیضی با قطرهای $3/5$ cm و ۶ cm استفاده شده است.

اوریفیس در داخل کانال و به فاصله ۲۰ cm از خروجی و ۳۵ cm 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 ۲۰۰ W ساخت شرکت Heinzinger مدل PCN 4000-5 استفاده شد. حداکثر ولتاژ و جریان خروجی از دستگاه به ترتیب ۴۰ kV و ۵ mA 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 ۱ cm 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 ۰/۰۱ mA (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 الکتروود 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 mA بالا می‌بریم. 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.

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

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

میزان نرخ تبخیر بر مبنای تغییرات رطوبت مخصوص در ورودی و خروجی کانال بروش زیر 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.

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

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 بی بعد الکتروهیدرودینامیک ارائه کرد. عدد الکتروهیدرودینامیک به صورت سرعت باد یونی (U_e) به سرعت جریان هوای محوری (U) تعریف می‌شود.

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

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 الکتروهیدرودینامیک 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 الکتروهیدرودینامیک 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.

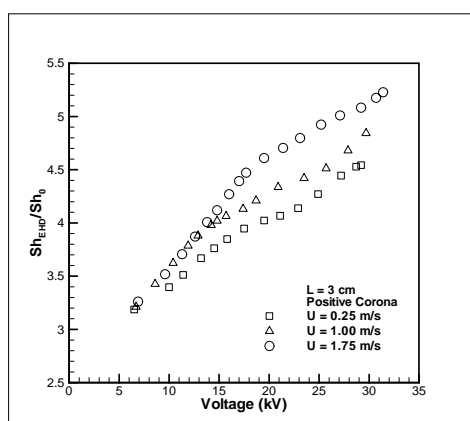
در آخر هم برای تعیین دقت روابط داده شده از داده‌های آزمایشگاهی از خط رگرسیون متناسب با داده‌ها استفاده می‌کنیم که بصورت زیر تعریف می‌شود.

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

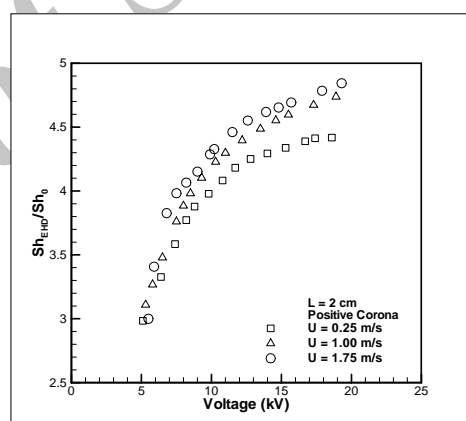
۵- نتایج آزمایشگاهی

به منظور ارائه نتایج و تعیین میزان بهبود 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 است. 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.

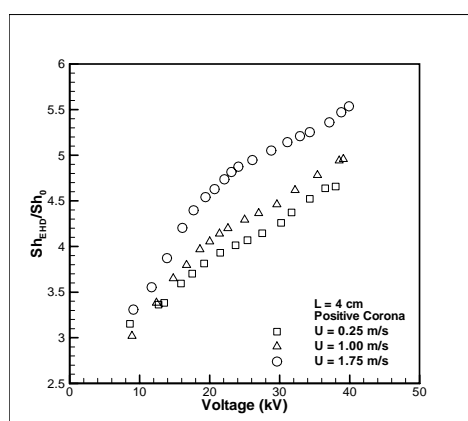
در شکل (۳) تغییرات بهبود نسبت بر حسب ولتاژ در تخلیه کرونای مثبت از الکترود سوزنی به قطر ۱ mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰/۲۵، ۱/۰۰ و ۱/۷۵ m/s و فواصل الکترودی ۲، ۳ و ۴ cm آورده شده است. با افزایش ولتاژ بر میزان نسبت تبخیر افزوده شده است. افزایش فاصله بین الکترودها منجر به افزایش ولتاژ شکست و افزایش نسبت تبخیر در ولتاژ شکست می‌شود. به عنوان نمونه در سرعت هوای محوری ۱/۷۵ m/s با افزایش فاصله الکترودها از ۲ cm به ۴ cm در ولتاژ شکست کرونای تغییرات بهبود تبخیر ۱۲/۵۲ درصد افزایش دارد.



ب) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۳ cm



الف) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۲ cm

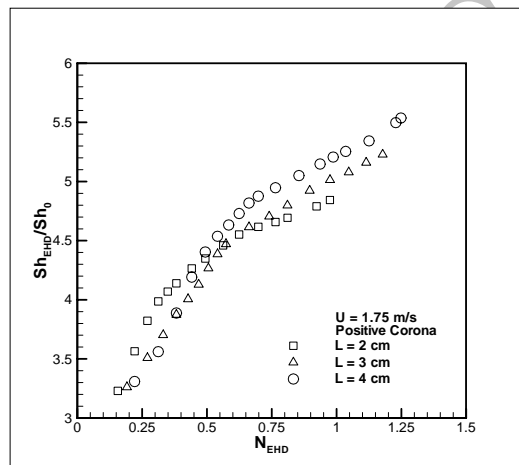


پ) فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای ۴ cm

شکل ۳ - تغییرات نسبت تبخیر بر حسب ولتاژ با تخلیه کرونای مثبت در سرعت‌های جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت

در تمامی نمودارها نسبت تبخیر با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. همچنین در یک فاصله الکترودی و ولتاژ مشخص افزایش سرعت هوای محوری افزایش نسبت تبخیر را به دنبال دارد. زیرا با افزایش سرعت هوای محوری در یک ولتاژ مشخص بر شدت جریان الکتریکی بین دو الکتروود افزوده می‌شود. و افزایش شدت جریان متناسب با افزایش سرعت باد یونی و در نتیجه افزایش نسبت تبخیر را دنبال دارد. بیشترین مقدار نسبت تبخیر در فاصله الکتروودی ۴ cm در سرعت هوای محوری ۱/۷۵ m/s را به میزان ۵/۵۳۶۷ به دست آمد.

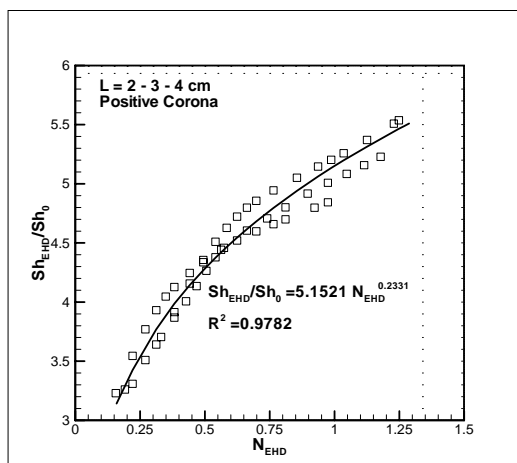
در شکل (۴) نمودارهای تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک در فواصل الکتروودی و سرعت های جریان هوای محوری متفاوت آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمامی فواصل الکتروودی روند تغییرات نسبت تبخیر تقریباً مشابه می‌باشد و این نتیجه تأییدی بر تاثیر غالب وزش باد یونی (نیروی کولمب) در افزایش نرخ تبخیر در اثر اعمال میدان الکتریکی است.



جریان هوای محوری با سرعت ۱/۷۵ m/s

شکل ۴ - تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک با تخلیه کرونای مثبت در فواصل الکتروودی متفاوت

در سرعت‌های هوای محوری مختلف تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک روندی به صورت زیر را دنبال می‌کنند. تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک برای سرعت هوای محوری ۱/۷۵ m/s و فواصل الکتروودی ۲ تا ۴ cm در شکل (۵) 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 الکتروهیدرودینامیک در سرعت‌های برابر و مستقل از سرعت جریان هوای محوری می‌باشد. با برآزش داده‌های تجربی و عبور منحنی از میان آنها رابطه‌ای جهت محاسبه میزان نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک به دست می‌آید.



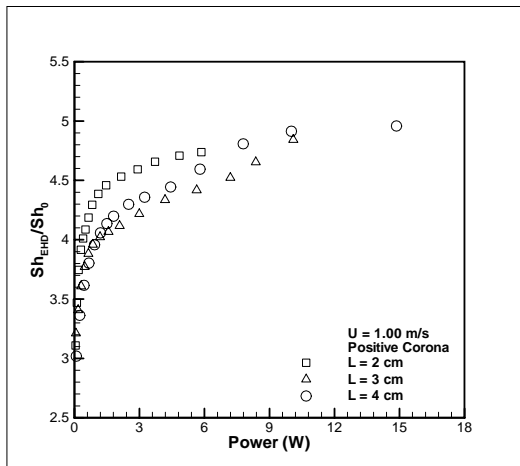
شکل ۵ - نسبت تبخیر در کرونای مثبت با استفاده از الکتروود سوزنی به قطر ۱ mm

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

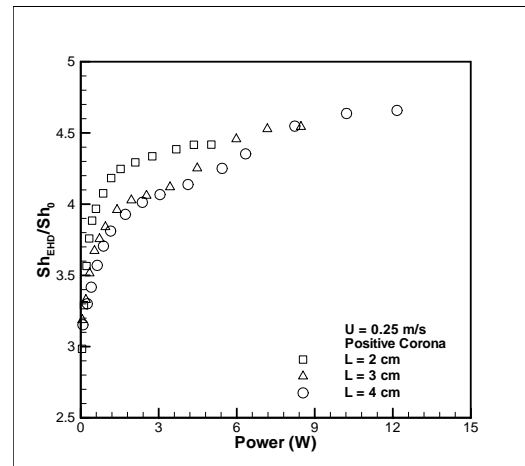
جدول ۱ - روابط ارائه شده برای تک الکتروود سوزنی با قطر ۱ mm با فواصل الکتروودی مختلف در جریان هوای محوری متفاوت با حضور کرونای مثبت

سرعت هوای محوری (m/s)	رابطه	R^2	
0.25	$Sh/Sh_0 = 2.6524N_{EHD}^{0.2653}$	0.9643	(۱۶)
1.00	$Sh/Sh_0 = 4.2804N_{EHD}^{0.2023}$	0.9895	(۱۷)
1.75	$Sh/Sh_0 = 5.1521N_{EHD}^{0.2331}$	0.9782	(۱۸)

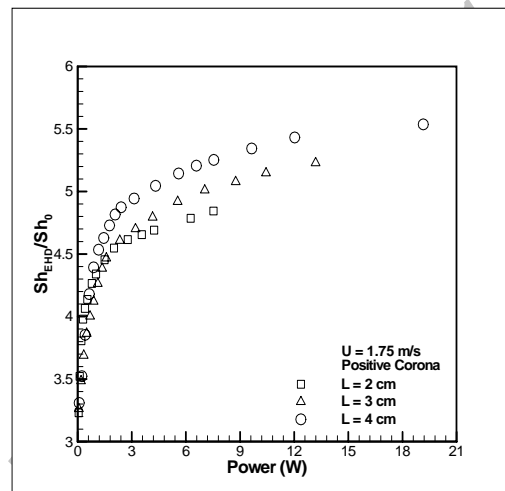
این روابط برای تمام فواصل الکتروود سوزنی (۲-۴ cm) در یک سرعت هوای محوری مشخص قابل استفاده می‌باشد. در شکل (۶) نسبت تبخیر بر حسب توان الکتریکی مصرفی در تخلیه کرونای مثبت از الکتروود سوزنی به قطر ۱ mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰/۲۵، ۱/۰۰ و ۱/۷۵ m/s و فواصل الکتروودی ۲، ۳ و ۴ آورده شده است.



الف) جریان هوای محوری با سرعت 1.00 m/s



الف) جریان هوای محوری با سرعت 0.25 m/s

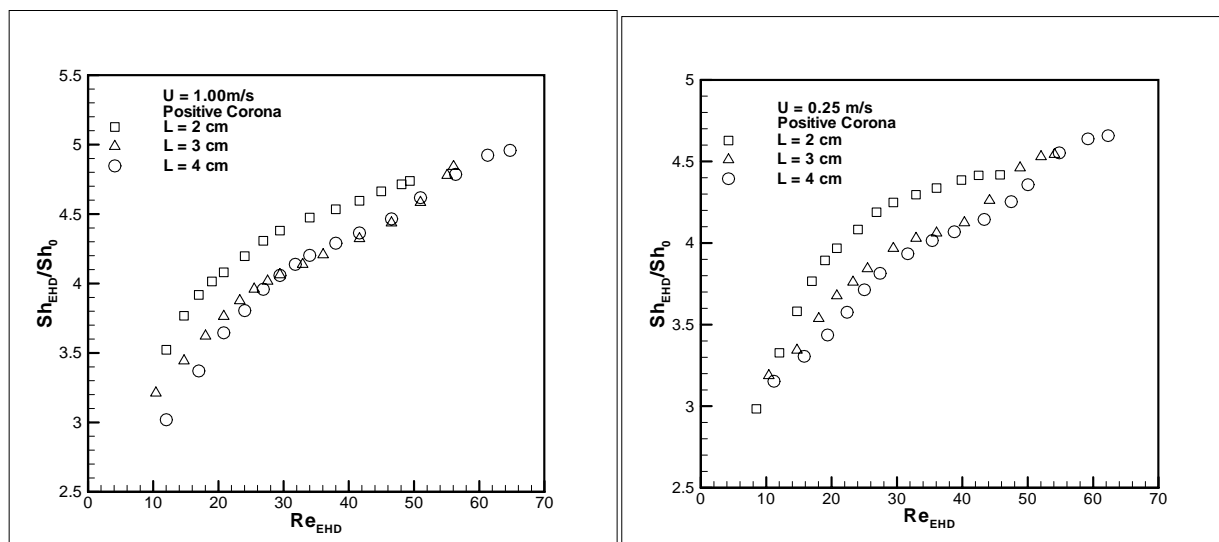


الف) جریان هوای محوری با سرعت 1.75 m/s

شکل ۶ - نسبت تبخیر بر حسب توان الکتریکی مصرفی با تخلیه کرونای مثبت در سرعت های جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت

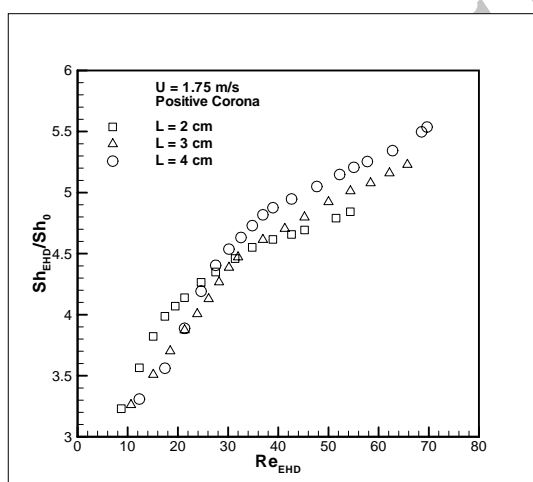
با افزایش توان الکتریکی مصرفی نسبت تبخیر در ابتدا با شیب تندی افزایش می یابد ولی با افزایش بیشتر توان به تدریج از شیب آن کاسته می شود و روند افزایشی بهبود با سرعت کمتری ادامه می یابد. مشاهده می شود که نسبت بهبود تبخیر در یک توان مصرفی مشخص در فواصل الکترودی مختلف نزدیک به هم است. لازم به یادآوری می باشد که در ولتاژ یکسان، کاهش فاصله الکترودها منجر به افزایش جریان الکتریکی و نسبت تبخیر می گردد. حال اگر I و V طوری تغییر کنند که حاصلضرب $V \times I$ ثابت بماند نسبت تبخیر نیز ثابت می ماند.

در شکل (۷) نمودارهای تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکترویدرودینامیک برای کرونای مثبت از الکترود سوزنی به قطر 1 mm با اعمال جریان هوای محوری با سرعت های 0.25 ، 1.00 و 1.75 m/s و فواصل الکترودی 2 ، 3 و 4 cm آورده شده است.



ب) جریان هوای محوری با سرعت ۱/۰۰ m/s

الف) جریان هوای محوری با سرعت ۰/۲۵ m/s



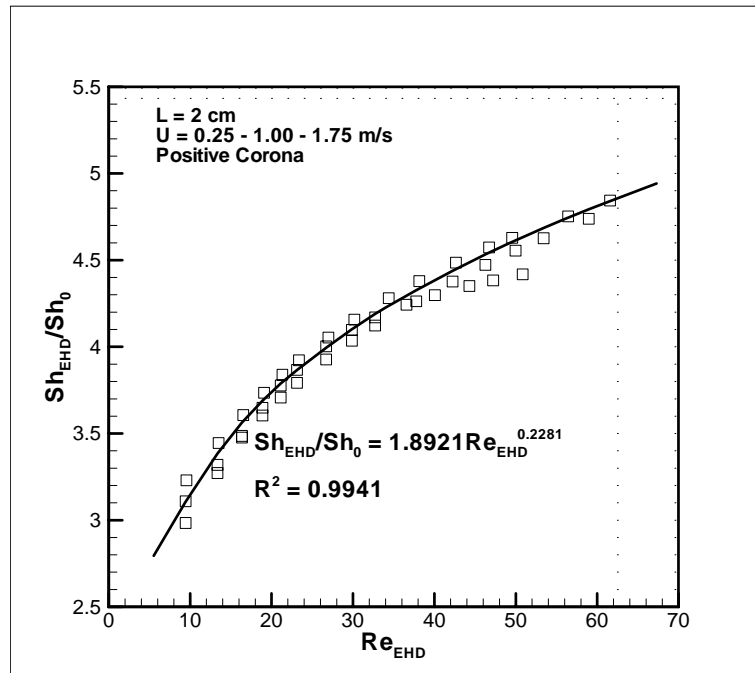
پ) جریان هوای محوری با سرعت ۱/۷۵ m/s

شکل ۷ - تغییرات نسبت بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک با تخلیه کرونای مثبت در سرعت های جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت

همانطور که مشاهده می شود مطابق انتظار با افزایش فواصل الکترودی و نیز با بالا رفتن شدت جریان که منجر به افزایش عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک می شود. نسبت تبخیر بیشتر می شود 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 می باشد. در هر سرعت های ۱/۰۰ و ۱/۷۵ m/s هوای محوری تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک روندی به صورت زیر را دنبال می کنند. تغییرات نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک برای فاصله الکترودی ۲ cm در جریان هوای محوری با سرعت های ۰/۲۵ تا ۱/۷۵ m/s در شکل (۸) آورده شده اند. نتیجه قابل توجهی که می توان با توجه به این نمودار به دست آورد نزدیکی مقادیر نسبت تبخیر در فواصل مختلف الکترودی می باشد. با برآزش داده های تجربی و عبور منحنی از میان آنها رابطه ای جهت محاسبه نسبت تبخیر بر حسب عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک

به دست می‌آید.

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



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

جدول ۲ - روابط ارائه شده برای تک الکترود سوزنی با قطر ۱ mm با اعمال جریان هوای محوری در فواصل الکترودی متفاوت با حضور کرونای مثبت

فاصله الکترود سوزنی و صفحه‌ای (cm)	رابطه	R^2	
2	$Sh/Sh_0 = 1.8921 Re_{EHD}^{0.2281}$	0.9941	(۱۹)
3	$Sh/Sh_0 = 17942 Re_{EHD}^{0.2493}$	0.9734	(۲۰)
4	$Sh/Sh_0 = 1.6641 Re_{EHD}^{0.2753}$	0.9852	(۲۱)

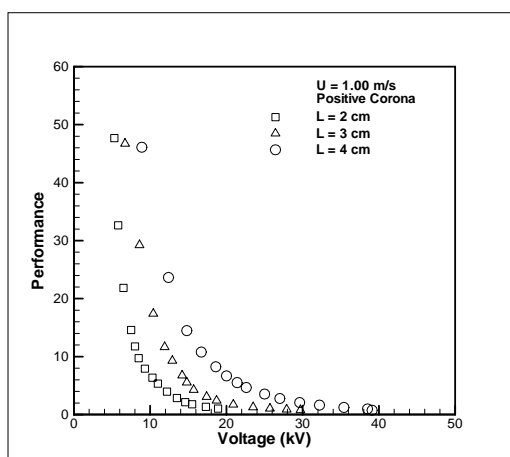
در شکل (۹) نمودارهای تغییرات کارایی بر حسب ولتاژ برای پلاریته مثبت با الکترود سوزنی به قطر ۱ با اعمال جریان هوای محوری با سرعت‌های ۰/۲۵، ۱/۰۰ و ۱/۷۵ m/s و فواصل الکترودی ۲، ۳ و ۴ cm آورده شده است. مصرف انرژی الکتریکی در ولتاژ آستانه که منجر به تولید باد یونی می‌گردد بسیار کم و در حدود ۰/۰۵۱ تا ۰/۰۹۳ W در محدوده فواصل الکترودی 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 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 الکترودی موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود ولی افزایش فاصله موجب کاهش جریان الکتریکی و توان مصرفی نیز می‌گردد. بدین ترتیب افزایش فاصله الکترودها اگرچه موجب کاهش نسبت تبخیر می‌شود ولی کاهش بیشتر انرژی الکتریکی مصرفی موجب افزایش کارایی در فواصل الکترودی بیشتر می‌گردد.

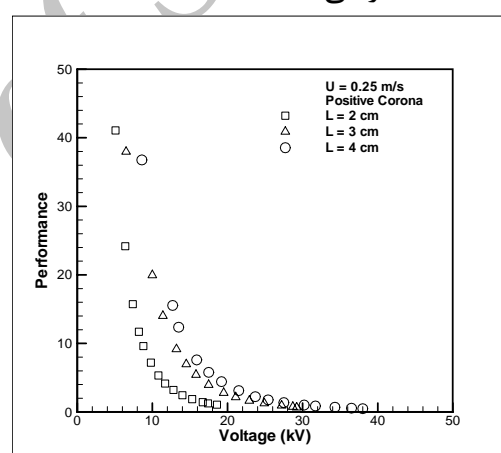
شکل (۱۰) کارایی کرونای مثبت را با استفاده از الکتروده سوزنی به قطر ۱ mm در جریان هوای محوری با سرعت‌های بالاتر از ۱/۰۰ m/s نشان می‌دهد. به کمک برازش داده‌های تجربی رابطه‌ای جهت محاسبه کارایی روش الکترودهیدرودینامیک برحسب سرعت بادیونی و سرعت جریان هوای محوری به دست آورده شده است.

$$P_e = \frac{7.1427}{(U_e^{2.055} \times U^{0.5})} \quad 1.00 \text{ m/s} \leq U < 1.75 \text{ m/s} \quad (22)$$

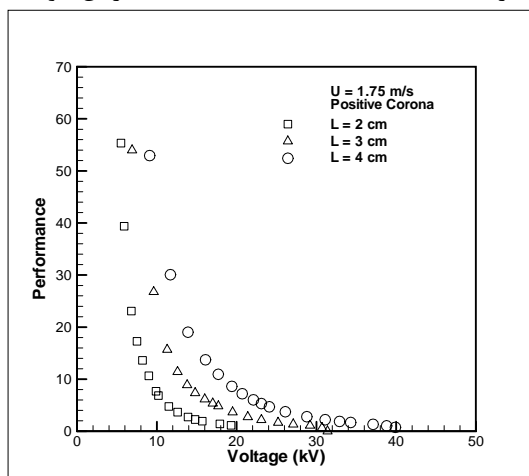
این رابطه برای تمامی فواصل الکترودی مورد آزمایش و جریان‌های هوای محوری با سرعت‌های ۱/۰۰ m/s و ۱/۷۵ m/s معتبر می‌باشد.



(ب) جریان هوای محوری با سرعت ۱/۰۰ m/s

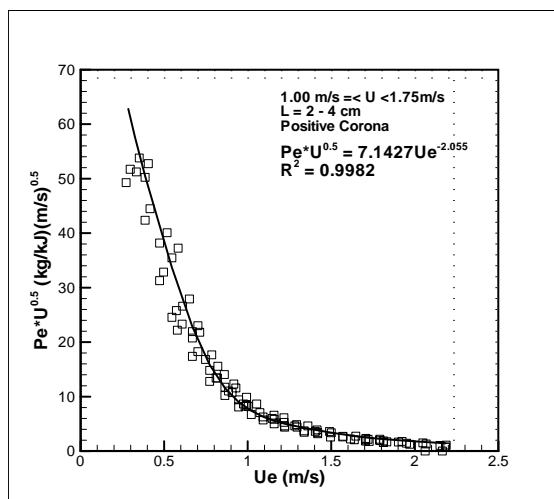


(الف) جریان هوای محوری با سرعت ۰/۲۵ m/s



(پ) جریان هوای محوری با سرعت ۱/۷۵ m/s

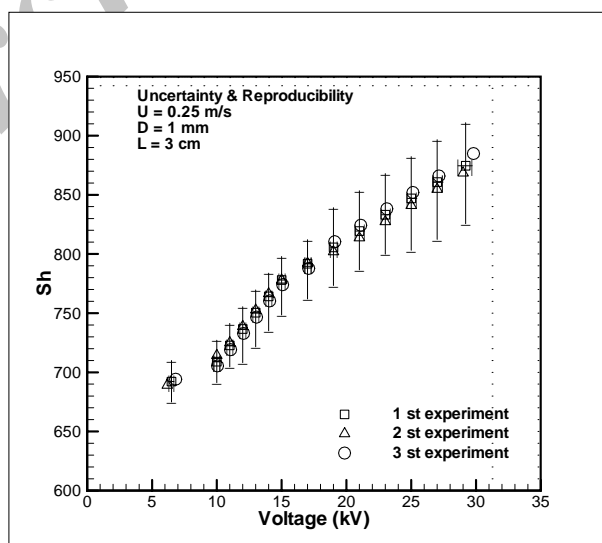
شکل ۹ - تغییرات کارایی بر حسب ولتاژ یا تخلیه کرونای مثبت در سرعت‌های جریان هوای محوری و فواصل الکترودی متفاوت



نمودار ۱۰ - تغییرات کارایی کرونای مثبت بر حسب باد یونی برای سرعت‌های هوای ۱٫۰۰ m/s و ۱٫۷۵ m/s

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 شروود کافی است مقادیر عدم قطعیت‌های سرعت هوا به میزان ۱٪، دمای هوا به میزان $\pm 0.2^\circ C$ ، 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 کنیم. در شکل (۱۱) تحلیل عدم قطعیت و تکرار پذیری برای عدد شروود در سرعت هوای ۰٫۲۵ m/s و فاصله الکترودی ۳ cm نشان داده است. حداقل و حداکثر عدم قطعیت محاسبه شده به ترتیب برابر ۱/۴٪ و ۸٪ 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.



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

^۱ Uncertainty

نتیجه‌گیری

افزایش فاصله الکترودها موجب به تاخیر افتادن ولتاژ شروع کرونا و افزایش ولتاژ شکست می‌شود. در ولتاژ و فاصله الکترودی ثابت با افزایش سرعت هوای محوری، جریان کرونا اندکی افزایش می‌یابد و به میزان تبخیر افزوده می‌شود. افزایش فاصله الکترودی در ولتاژ ثابت با کاهش جریان الکتریکی همراه بوده و موجب کاهش بهبود 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 بهبود تبخیر تا ۱۸/۸۶٪ افزایش یافته و از ۴/۶۵۷۹ به ۵/۵۳۶۷ برابر می‌رسد. استفاده از روش الکتروهیدرودینامیک با مصرف انرژی بسیار کم، افزایش قابل توجه تبخیر را به همراه دارد. به عنوان مثال با مصرف توان الکتریکی ۰/۰۵۱ W تشدید معادل ۴/۴۱۷۸ برابر حاصل می‌شود. افزایش فاصله الکترودها در ولتاژ ثابت علیرغم اینکه موجب کاهش نسبت تبخیر می‌گردد، میزان کارایی روش الکتروهیدرودینامیکی را افزایش می‌دهد. نسبت تبخیر بر حسب عدد الکتروهیدرودینامیک در فواصل الکترودی متفاوت تقریباً یکسان می‌باشد که بیانگر تاثیر غالب باد یونی (نیروی کولمب) در نسبت تبخیر است. افزایش فاصله الکترودی در ولتاژ ثابت موجب پایین آمدن جریان الکتریکی و در نتیجه باعث پایین آمدن عدد رینولدز الکتروهیدرودینامیک می‌شود و لذا موجب کاهش بهبود 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 Electrohydrodynamic 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] 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).
- [7] 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).
- [8] Bologna, M.K., Savin, I.K., and Didkovsky, A.B., "Electric-field-induced Enhancement of Vapour Condensation Heat Transfer in the Presence of a Non-condensable Gas", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1558–77, (1987).
- [9] 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. 147–51, (1997).
- [10] Bologna, M.K., Savin, I.K., and Didkovsky, A.B., "Electric-field-induced Enhancement of Vapour Condensation Heat Transfer in the Presence of a Non-condensable gas", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1577–85, (1987).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Holmes, R.E., and Chapman, A.J., "Condensation of Freon-114 in the Presence of a Strong Nouniform Alternating Electric Field", *J. Heat Transfer*, Vol. 92, pp. 616–20, (1970).
- [14] Wawzyniak, M., and Seyed-Yagoobi, J., "Experimental Study of lectrohydrodynamically Augmented Condensation Heat Transfer on a Smooth and an Enhanced Tube", *J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 499–502, (1996).
- [14] 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).
- [15] Moreau, E., Ger, 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).
- [16] 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).

- [17] Alemrajabi, A., and Lai, F. C., "EHD-Enhanced Drying of Partially Wetted Glass Beads", *Drying Technology*, Vol. 23, pp. 597–609, (2005).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] Kamkari, B., Alemrajabi, A.A., "Investigation of Electrohydrodynamically Enhanced Convective Heat and Mass Transfer from Water Surface", *Int. J. Heat Transfer Engineering*, Vol. 31, pp. 138–146, (2010).
- [21] Darabi, J., Ohadi, M.M., and Devoe, D., "An Electrohydrodynamic Polarization Micropump for Electronic Cooling", *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 10, pp. 98–106, (2001).
- [22] Barthakur, N.N., "Electrostatically Enhanced Evaporation Rates of Saline Water", *Desalination*, Vol. 74, pp. 339-353, (1989).
- [23] Lai, F.C., and Sharma, R.K., "EHD-Enhanced Drying with Multiple Needle Electrode", *J. Electrostatics*, Vol. 63, pp. 223–237, (2005),
- [24] Subir, R., "*An Introduction to High Voltage Engineering*", Prentice – Hall, New York, (2004).
- [25] Kuffel, E., Zaengl, W. S., and Kuffel, J., "*High Voltage Engineering: Fundamentals*", Newness, 2nd Edition, Jordan Hill, Oxford, London, (2000).
- [26] Kibler, K. G., and Carter, H. G., "Electrocooling of Gases", *J. Applied Physics*, Vol. 45, pp. 4436-4440, (1974).
- [۲۷] پناهی، م.، " بررسی تجربی اثر شکل و هندسه الکتروود بر نرخ تبخیر آب به روش الکتروهیدرودینامیکی (EHD)", پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مکانیک، (۱۳۸۹).
- [28] 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 مولکول‌های آب در هوا (m^2 / s)
- D_L : طول مشخصه (m)
- E : شدت میدان الکتریکی (V/m)
- F_e : نیروی حجمی الکترووایدرو دینامیکی (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 : (m/s)
- U_e : (m/s)
- V : (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

Archive of SID

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 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 ratio was 4.351 for air velocity of 1.75 m/s, respectively The evaporation enhancement increases whit increasing voltage and decreases whit increasing the electrode spacing at a fixed voltage.

Archive of SID