

## ارزیابی یک پاشنده فنجانی دوار و تولید قطره به منظور استفاده در سامانه‌های نمک‌زدایی از آب‌های شور

شهاد کامفیروزی<sup>۱</sup>، شیوا گرجیان<sup>۲\*</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، k.shahdad@modares.ac.ir

۲. استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، gorjian@modares.ac.ir

۳. استاد گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، ghabadib@modares.ac.ir

### چکیده

یکی از منابع تأمین آب در شرایط خشک‌سالی استفاده از آب‌های شور و لب‌شور است. از این رو، نمک‌زدایی یکی از قدیمی‌ترین فناوری‌هایی است که بشر برای خالص‌سازی آب‌شور در جهان از آن استفاده کرده است. در سال‌های اخیر، فناوری تبخیر پاششی برای دفع فاضلاب با شوری زیاد در بسیاری از مصارف صنعتی از جمله نمک‌زدایی از آب دریا و تصفیه فاضلاب به دلیل مزایای آن از میزان تبخیر بالا و عدم وجود شورابه پیشنهاد شده است. از این رو در این تحقیق، با توجه به نیاز تولید قطره با کمیت و کیفیت مناسب و همچنین کمینه انرژی مصرفی در تبخیر پاششی، به طراحی و ساخت یک پاشنده فنجانی دوار به کمک فناوری پرینت سه‌بعدی و ارزیابی آن به کمک کاغذهای حساس به آب و پردازش تصویر با نرم‌افزار ImageJ پرداخته شده است. ارزیابی پاشنده ساخته شده توسط کاغذهای حساس به آب نشان داد که اندازه قطره بیش از هر چیز وابسته به سرعت دورانی فنجان است و با افزایش سرعت دورانی علاوه بر کاهش قطر قطرات تولیدشده، میانگین قطر قطرات تولیدشده نیز یکنواخت تر خواهد شد. نتایج ارزیابی نشان دادند پاشنده ساخته شده در سرعت دورانی ۶۰۰۰ rpm، با کمینه انرژی مصرفی، تولید قطره دارای عملکرد بالاتری نسبت به دیگر شرایط ارزیابی دارد و قطر میانگین قطرات یکنواخت تر است.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، قطره، پاشنده فنجانی دوار، تبخیر پاششی، پردازش تصویر.

\*نویسنده مسئول

شیوا گرجیان

ایمیل: gorjian@modares.ac.ir

## مقدمه

در حال حاضر تولید آب شیرین یکی از مهم‌ترین مشکلات جهان امروزی به‌خصوص در مناطق با آب و هوای خشک است. ایران نیز با توجه به اینکه در کمربند خشک زمین قرار گرفته با بحران جدی آب مواجه است [1]. یکی از منابع تأمین آب در شرایط خشک‌سالی استفاده از آب‌های شور است، از این رو نمک‌زدایی یکی از قدیمی‌ترین فناوری‌هایی است که بشر برای خالص‌سازی آب‌شور در جهان از آن استفاده کرده است. تقطیر خورشیدی با روش رطوبت زنی و رطوبت‌زدایی (HDH)<sup>۱</sup> یک راهکار مفید است که بر اساس ظرفیت ترکیب هوا با مقدار زیاد بخار آب استوار بوده و اصول ترمودینامیکی آن با استفاده از نمودار روان‌سنجی<sup>۲</sup> قابل توضیح است. در سال‌های اخیر، فناوری تبخیر پاششی برای دفع فاضلاب با شوری زیاد در بسیاری از مصارف صنعتی از جمله نمک‌زدایی از آب دریا و تصفیه فاضلاب به دلیل مزایای آن از میزان تبخیر بالا و عدم وجود شورابه پیشنهاد شده است [3]، [2]. آزمایش‌ها و مطالعات بسیاری بر روی تأثیر جهت پاشش بر روی پدیده‌ی تبخیر انجام شده‌اند. نتایج نشان داده‌اند که روش استفاده از نازل به سمت بالا و پاشش به صورت فواره‌ای مسافت کمتری برای تکمیل تبخیر نسبت به سایر روش‌های به‌کارگیری نازل خواهد داشت [4]. در تحقیقی به‌منظور بهبود عملکرد تبخیر، یک محفظه‌ی تقطیر پاششی از نوع سیکلون توسعه داده شد. تأثیر نسبت حجم گاز به مایع، دما و سرعت هوای گرم ورودی، دمای مایع تغذیه و فشار نازل هنگام تبخیر به صورت آزمایشی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که جریان چرخشی، زمان اقامت قطره‌ها در محفظه را طولانی‌تر می‌کند، بنابراین عملکرد تبخیر می‌تواند بهبود یابد [5]. توسعه سریع میدان حرارتی ارتباط نزدیکی انتقال گرما و تغییر فاز شدید دارد از این رو با افزایش دمای هوای گرم ورودی به محفظه‌ی تبخیر، می‌توان عملکرد تبخیر را به میزان قابل توجهی بهبود داد [5]. آزمایش‌هایی برای بررسی تأثیر عدد ژاکوب<sup>۳</sup> (Ja) روی تبخیر ناگهانی<sup>۴</sup> به وسیله پاشش تحت فشار و دمای بالا انجام شده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده‌اند که با افزایش عدد ژاکوب عملکرد تبخیر ناگهانی افزایش خواهد یافت [6]. در تحقیقی عددی برای تجزیه و تحلیل تبخیر ناگهانی، از مدل تبخیر کنترل شونده<sup>۵</sup> استفاده شد. نتایج نشان دادند که قطر محاسبه‌شده قطره نقش مهمی را در سرعت و عملکرد تبخیر ایفا می‌کند [7]. در یک تحقیق تجربی، توسعه و مطالعه فرآیند پاشش در تبخیر ناگهانی در حالی که آب داغ در محفظه‌ای تحت خلأ پاشیده می‌شود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که نازل‌های با قطر کوچک‌تر توانایی ایجاد قطره‌های ریز را خواهند داشت و همچنین قطره‌های کوچک‌تر این امکان را می‌دهند که فرآیند تبخیر در طی یک فاصله عمودی کمتر از ۰/۵ متر تکمیل شود. بنابراین، امکان طراحی تبخیرکننده‌های کوچک‌تر فراهم خواهد شد [8].

با توجه به پیشینه‌ی تحقیق و بررسی‌های انجام‌شده بر روی سامانه‌های نمک‌زدایی پاششی، محققین بیشتر به استفاده از نازل با فشار بالا و شرایط عملکردی تحت فشار پایین و استفاده خلأ پرداخته‌اند. همان‌طور که پیدا است استفاده از پاشش در سامانه‌های نمک‌زدایی به افزایش عملکرد تبخیر و تولید آب شیرین کمک قابل توجهی خواهد کرد. راهکارهایی که محققین تا به حال استفاده کرده‌اند دارای مزایا و معایب متعددی هستند. استفاده از نازل‌ها و انواع شرایط کارکرد همان‌طور که بیان شد موجب تولید قطره از آب‌شور خوراکی خواهد شد اما نکته‌ی قابل توجه در مورد استفاده از آن‌ها نیاز به فشار بالا برای تولید قطره و وجود ارتباط مستقیم بین فشار بالاتر و کوچک‌تر شدن

<sup>1</sup> Humidification-dehumidification

<sup>2</sup> Psychometric chart

<sup>3</sup> Jakob number

<sup>4</sup> Evaporation flash

<sup>5</sup> Diffusion-controlled evaporation model

اندازه قطره است. ایجاد فشارهای بالا خود نیاز به صرف انرژی زیادی خواهد داشت. با وجود افزایش عملکرد تولید آب شیرین باید توجه داشت که عامل مخرب انرژی مصرفی مورد نیاز برای تولید قطره‌های کوچک نیز افزایش پیدا خواهد کرد. از طرفی نیز نازل‌ها طولانی تولید قطره با قطر میانگین یکسان را نداشته و پراکندگی قطر قطره نیز وجود خواهد داشت که این امر در طراحی سامانه نمک‌زدایی پاشی چالش‌هایی را به وجود خواهد آورد. لذا، در این تحقیق با ارزیابی یک پاشنده فنجانی دوار<sup>۱</sup> به وسیله پردازش تصویر<sup>۲</sup> و کاغذهای حساس به آب<sup>۳</sup>، امکان تولید قطره به منظور نمک‌زدایی با کمینه انرژی مصرفی بررسی شده است.

#### مواد و روش‌ها

طراحی پاشنده فنجانی دوار با در نظر گرفتن مقدار معینی از قطر قطره تولیدی، خصوصیات فیزیکی سیال ورودی و دبی حجمی آن انجام می‌گیرد. مقادیر فرض شده شامل؛ قطر میانگین قطره  $100 \mu\text{m}$  در دامنه  $80-120 \mu\text{m}$  و آب شور خوراک (آب دریا) با سطح شوری  $35000 \text{ ppm}$  است. قطر قطره یکی از مهم‌ترین عوامل در عملکرد تبخیر فناوری نمک‌زدایی پاشی است. اگر قطره‌ای با قطر  $100 \mu\text{m}$  به صورت آزاد و بدون شتاب از ارتفاع مشخصی رها شود، بیشینه زمان مورد نیاز برای تبخیر کامل آن در دمای اتاق  $7$  ثانیه است [9]. از این رو این فرض برای طراحی پاشنده فنجانی در نظر گرفته شده است.

با معین بودن قطر قطره (D) تولید شده و در نظر گرفتن رابطه بین سرعت زاویه‌ای فنجان دوار و شعاع آن طبق رابطه (۱) [10]، شعاع فنجان تعیین می‌شود. در این رابطه با توجه به محدودیت‌ها در ساخت و امکان پذیر بودن آن، سرعت زاویه‌ای در حدود  $500 \text{ rad.s}^{-1}$  در نظر گرفته شده است.

$$D = \sqrt{\frac{A\gamma}{\rho\omega^2 R}} \quad (1)$$

که در این رابطه؛

$A$  = مقدار ثابت و برابر ۶،

$\gamma$  = کشش سطحی آب دریا ( $0.07215 \text{ N.m}^{-1}$ )

$\rho$  = چگالی آب دریا ( $1022 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$\omega$  = سرعت زاویه ( $523 \text{ rad.s}^{-1}$ )

$R$  = شعاع فنجان (m)،

$D$  = قطر میانگین قطره ( $100 \mu\text{m}$ ).

فرآیند پاشش و تولید در پاشنده فنجانی دوار (گریز از مرکز) به سه مرحله تقسیم می‌شود: اول، سیال به یک لایه‌ی نازک بر روی سطح داخلی پاشنده پخش می‌شود. سپس رشته‌های سیال درون دندانه‌های داخلی فنجان تشکیل می‌شوند و در نهایت رشته‌های سیال در لبه‌های فنجان شکسته می‌شوند و یک قطره را ایجاد می‌کنند [11]، [12]. جریان سیال درون فنجان دوار یک جریان چرخش متقارن محوری است. با توجه به مختصات قطبی هیدرودینامیک غیر قابل تراکم، قوانین سیال نیوتنی و حرکت معتبر است. بنابراین، روابط (۲ و ۳) را می‌توان ارائه کرد [13].

$$\rho \frac{u_r}{r} + \rho \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho u_\theta) = 0 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Rotary cup atomizer

<sup>2</sup> Image processing

<sup>3</sup> Water-sensitive papers

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\rho}{\partial r} \left( \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

در این روابط؛

$$u_r = \text{سرعت شعاعی (m.s}^{-1}\text{)},$$

$$u_z = \text{سرعت محوری (m.s}^{-1}\text{)},$$

$$u_\theta = \text{سرعت مماسی (m.s}^{-1}\text{)}.$$

از آنجا که الگوی جریان سیال روی سطح پاشنده فنجان دوار جریان لغزشی نیست، شرایط مرزی گاز-مایع حاکم است بنابراین فشار تقریباً صفر است. طبق رابطه (۴) دبی حجمی ورودی به پاشنده تعیین خواهد شد و همچنین طبق رابطه (۵) ضخامت لایه نازک سیال در انتهای لبه پاشنده تعیین خواهد شد.

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^\delta u_r r d\theta dz = 2\pi \int_0^\delta u_r r dz \quad (4)$$

$$\delta = \left( \frac{3}{2} \frac{Q\mu}{\pi r^2 \omega^2 \rho} \right)^{1/3} \quad (5)$$

در این روابط؛

$$\delta = \text{ضخامت لایه نازک سیال (m)},$$

$$\mu = \text{گرانروی دینامیک سیال (N.s.m}^{-2}\text{)},$$

$$Q = \text{دبی حجمی (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)},$$

$$r = \text{شعاع فنجان (mm)}.$$

ساختار یک پاشنده فنجان دوار علاوه بر موارد ذکر شده شامل متغیرهایی دیگری نیز است. تأثیر تعداد شیار، هندسه دندانه، زاویه مخروطی و ارتفاع دیگر متغیرهایی هستند که در عملکرد پاشش نادیده گرفته شده و روابط بیان شده ساده سازی شده‌اند. شیارها و دندانه‌های تیز در عملکرد تخلیه و انحراف قطره‌ها تأثیرگذار هستند بنابراین می‌توان چسبندگی سیال درون فنجان را افزایش داد. زاویه مخروطی و ارتفاع می‌تواند بر طول تماس سیال با دیواره پاشنده تأثیر بگذارد بنابراین، بر عملکرد پاشش مؤثر خواهد بود اما در این تحقیق نادیده گرفته شده است.

بر اساس فرضیات و روابط بیان شده قطر فنجان ۱۱۶ mm و دبی آب ورودی ۳۰ lit.h<sup>-1</sup> محاسبه شد و هندسه فنجان موردنظر به کمک فناوری پرینتر سه بعدی ساخته شد. نمای سه بعدی و برش خورده از پاشنده فنجان دوار به همراه اجزای شکل دهنده در شکل ۱ نمایش داده شده است. عملکرد پاشنده ساخته شده در سه سطح سرعت دورانی rpm ۳۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۵۰۰ از نظر کمیت و کیفیت تولید قطره به کمک کاغذهای حساس به آب و همچنین انرژی مصرفی مورد ارزیابی قرار گرفت.

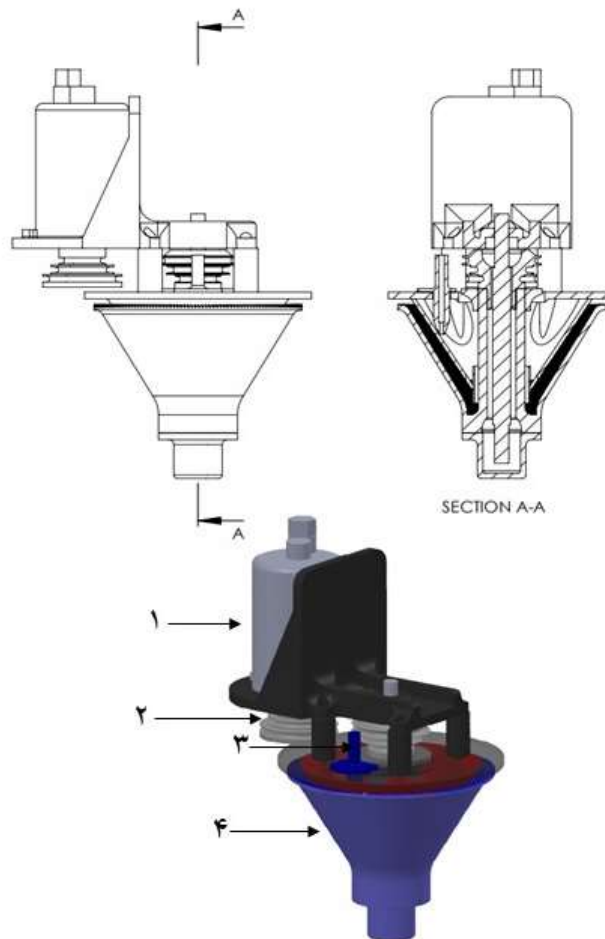
به منظور ارزیابی متغیرهای موردنظر در پاشنده دوار از کاغذهای حساس به آب استفاده شد. این کاغذها زردرنگ هستند و حاوی محلول آبی<sup>۱</sup> بوده که به محض برخورد آب به علت یونیزه شدن رنگ اصلی، آبی رنگ می‌شوند و اثر قطره را بر روی خود ثبت می‌کند که با دقت خوبی با روش پردازش تصویر امکان تجزیه تحلیل کمیت و کیفیت قطره‌های تولیدشده را می‌دهد.

به منظور ارزیابی کاغذهای حساس به آب که اثر قطره بر روی آنها به جای مانده است از نرم‌افزار "ImageJ" استفاده شد. ابتدا نیاز است که تصویر از کاغذهای موردنظر برداشت شود تا قابل پردازش باشد.

نرم‌افزار ImageJ بر پایه Java کد نویسی شده و یک نرم‌افزار پردازش تصویر است که در بسیاری از مسائل پردازش و تحلیل تصاویر استفاده می‌شود. این نرم‌افزار توسط موسسه ملی بهداشت (آمریکا) توسعه داده شد و در

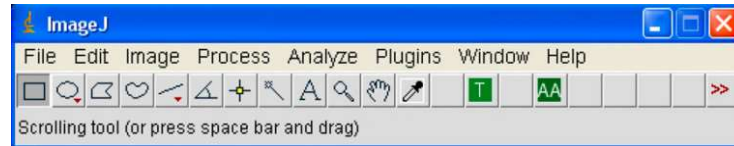
<sup>1</sup> Bromophenol blue

حال حاضر آزادانه در دسترس عموم است [14]. از ImageJ می‌توان برای اندازه‌گیری یک ناحیه و شمارش تعداد نقاط در مناطق تعریف‌شده توسط کاربر یا در کل تصویر استفاده کرد. شکل مناطق انتخاب‌شده می‌تواند مستطیل، بیضوی یا نامنظم باشد. این برنامه به‌طور هم‌زمان از هر تعداد تصویر پشتیبانی می‌کند و فقط توسط حافظه دسترسی تصادفی موجود محدود می‌شود. سرعت پردازش تصویر این نرم‌افزار ۴۰ میلیون پیکسل در ثانیه است. از یک درایور TWAIN، یک پروتکل نرم‌افزاری استاندارد و رابط برنامه‌نویسی برنامه‌ها برای ارتباط بین برنامه ImageJ و اسکنر انتخاب‌شده استفاده می‌شود.



شکل ۱: نمای سه‌بعدی و برش خورده از مدل نهایی پاشنده فنجانی دوار تشکیل شده از: ۱- موتور، ۲- گیربکس افزایشنده، ۳- ورودی آب، ۴- فنجان دوار.

ابتدا به کمک نرم‌افزار ImageJ یک کاغذ حساس به آب (یا هر نوع بستری که این توانایی را داشته باشد) را اسکن کرده و باید آن را به یک تصویر در ابعاد خاکستری ۸ بیتی تبدیل کرد (شکل ۲).



شکل ۲: نمایی از نرم‌افزار ImageJ.

سپس با وارد شدن به بخش ANALYSIS، کاربر عملکرد موردنیاز خود را اجرا می‌کند و نرم‌افزار پیکسل‌های سیاه‌وسفید را می‌شمارد و سپس منطقه‌ای را برای تجزیه و تحلیل انتخاب می‌کند تا تعداد نقاط و مساحت هر نقطه را در بخش انتخاب‌شده به دست آورد. در نهایت، برنامه دسته‌های  $D_{v0.1}$ ،  $D_{v0.5}$  و  $D_{v0.9}$  را محاسبه می‌کند و نتایج را از ناحیه بخش انتخاب‌شده شامل؛ تعداد کل نقاط و درصد منطقه تحت پوشش لکه‌ها نمایش می‌دهد.  $D_{v0.1}$ ،  $D_{v0.5}$  و  $D_{v0.9}$  توزیع قطر قطرات را نشان می‌دهد به طوری که قطرات با قطر کوچک‌تر از  $D_{v0.1}$ ،  $D_{v0.5}$  و  $D_{v0.9}$  به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد حجم کل مایع را تشکیل می‌دهد. این برنامه برای تنظیم کیفیت تشخیص تصویر دو گزینه برای انتخاب آستانه دارد. اولین گزینه به سیستم اجازه می‌دهد تا آستانه تشخیص را بر اساس تباین تصویر به طور خودکار انتخاب کند. گزینه دوم یک آستانه تعریف‌شده توسط کاربر برای انتخاب کیفیت تشخیص تصویر برای مطابقت با الگوهای واقعی است. برای تبدیل ناحیه نقطه به قطر قطره واقعی از رابطه (۶) استفاده می‌شود [15]:

$$d = 0.95 d_s^{0.91} \quad (6)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (7)$$

در این رابطه؛

$d$  = قطر قطره حسب  $(\mu\text{m})$ ؛

$A$  = مساحت ناحیه رنگی حسب  $(\mu\text{m}^2)$ .

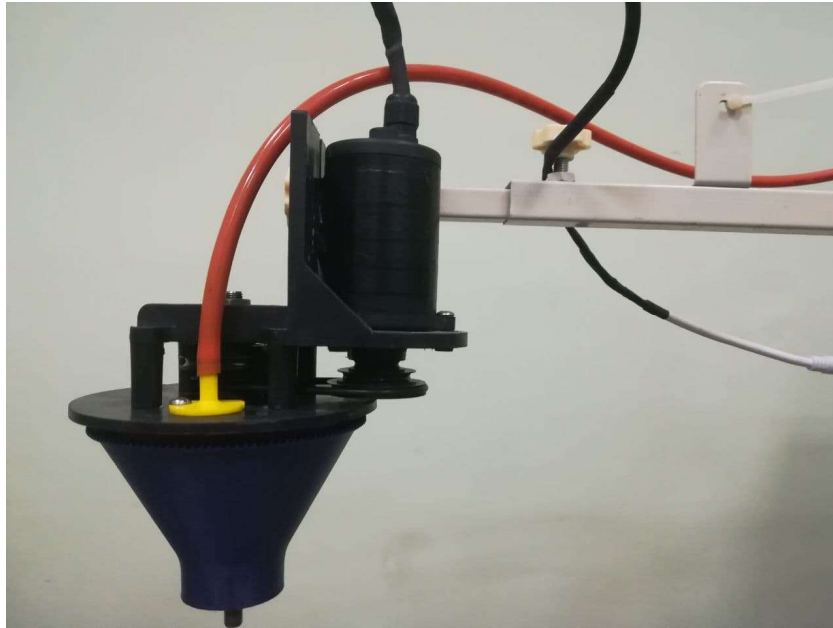
ناحیه لکه به دست آمده برابر است با تعداد پیکسل‌های عکس نقطه‌ای تقسیم بر روی وضوح اسکن محاسبه می‌شود. در این برنامه، وضوح اسکن ۲۴۰۰ نقطه در هر اینچ (dpi) یا  $10/58 \mu\text{m}$  در هر پیکسل انتخاب‌شده است. در نهایت برای محاسبه قطر قطره واقعی از رابطه (۸) می‌توان استفاده کرد.

$$d = 1.6 A^{0.455} \quad (8)$$

لازم به ذکر است که این برنامه نمی‌تواند ناحیه رنگی که از یک قطره تا چند قطره باهم تداخل دارند را تشخیص دهد.

بحث و نتایج:

فنجان ساخته‌شده به کمک فناوری پرینت سه‌بعدی در شرایط ثابت فشار ۱ bar و دبی حجمی  $30 \text{ lit}\cdot\text{h}^{-1}$  در سه سطح سرعت دورانی ۳۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۸۵۰۰ توسط کاغذهای حساس به آب و پردازش تصویر مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳). اثر به جای مانده قطرات آب بر روی کاغذهای حساس به آب در شکل ۴ نشان داده شده است.



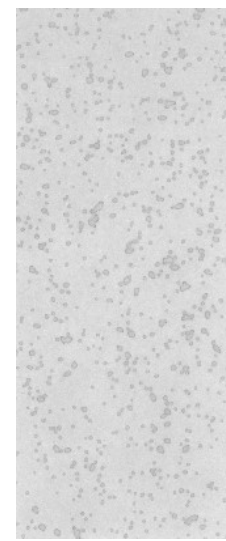
شکل ۳: نمایی از پاشنده فنجان‌ی دوار ساخته شده در این تحقیق.



ج- ۸۵۰۰ rpm



ب- ۶۰۰۰ rpm



الف- ۳۵۰۰ rpm

شکل ۴: سه نمونه از اثر قطره بر روی کاغذهای حساس به آب در دورهای مختلف پاشنده دوار فنجان‌ی.

ارزیابی کاغذهای حساس به آب نشان داد که به ترتیب در سه سطح دور ارزیابی شده، ۸۰٪، ۶۱/۵ و ۹/۴ از قطرات با قطر میانگین  $100 \mu\text{m}$  هستند و انرژی مصرفی نیز به ترتیب برابر با ۴۸ Wh، ۲۷/۱ و ۱۹/۲ به دست آمد (جدول ۱).

جدول ۱: نتایج حاصل از ارزیابی کاغذهای حساس به آب.

سرعت دورانی (rpm)      قطر میانگین  $100 \mu\text{m}$  (%)      انرژی مصرفی (Wh)

۱۹/۲	۹/۴	۳۵۰۰
۲۷/۱	۶۱/۵	۶۰۰۰
۴۸	۸۰	۸۵۰۰

نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی از ۳۵۰۰ rpm به ۶۰۰۰، میزان تولید قطره با قطر میانگین  $100\ \mu\text{m}$ ، ۶۵٪ افزایش یافت در حالی که انرژی مصرفی ۴۱٪ افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر با افزایش سرعت دورانی از ۶۰۰۰ rpm به ۸۵۰۰، میزان تولید قطره با قطر میانگین  $100\ \mu\text{m}$ ، ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که انرژی مصرفی ۷۷٪ افزایش داشته است.

#### نتیجه‌گیری:

فناوری نمک‌زدایی پاششی، یکی از راهکارهای مفید برای افزایش عملکرد تبخیر در نمک‌زدایی حرارتی است. از این رو نیاز است در شرایط کمبود منابع آب شیرین، به‌منظور افزایش عملکرد تبخیر در سامانه‌های نمک‌زدایی حرارتی به توسعه انواع پاشنده‌ها پرداخت. ارزیابی پاشنده فنجانی دوار ساخته‌شده توسط کاغذهای حساس به آب نشان داد که اندازه قطره بیش از هر چیز وابسته به سرعت دورانی فنجان است و با افزایش سرعت دورانی علاوه بر کاهش قطر قطرات تولیدشده، میانگین قطر قطرات تولیدشده نیز یکنواخت‌تر خواهد شد. نتایج ارزیابی نشان داد که با افزایش سرعت دورانی از ۳۵۰۰ rpm به ۶۰۰۰، میزان تولید قطره با قطر میانگین  $100\ \mu\text{m}$ ، ۶/۵ برابر شده است در حالی که انرژی مصرفی ۴۱ درصد افزایش پیدا کرده است. از سوی دیگر با افزایش سرعت دورانی از ۶۰۰۰ rpm به ۸۵۰۰، میزان تولید قطره با قطر میانگین  $100\ \mu\text{m}$ ، ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که انرژی مصرفی ۷۷٪ افزایش داشته است. لذا، پاشنده ساخته‌شده در سرعت دورانی ۶۰۰۰ rpm، از جهات انرژی مصرفی، کمیت و کیفیت تولید قطره دارای عملکرد بالاتری نسبت به دیگر شرایط ارزیابی داشت. شایان ذکر است برای تعیین حالت بهینه عملکرد نیاز است آزمایش‌های گسترده‌تر به همراه در نظر گرفتن دیگر عوامل ساختاری پاشنده فنجانی دوار صورت پذیرد. با توجه به نتایج ارزیابی استفاده از پاشنده فنجانی دوار در سامانه‌های نمک‌زدایی پاششی منجر به کاهش ارتفاع محفظه تبخیر و افزایش زمان اقامت قطره خواهد شد و همچنین با توجه به سطح مصرف انرژی در مقایسه استفاده از نازل‌ها با فشار و از سوی دیگر بهبود کیفیت تولید قطره از نظر قطر میانگین یکسان، افزایش عملکرد نمک‌زدایی حرارتی را به همراه خواهد داشت.

#### منابع

- [1] S. Gorjian and B. Ghobadian, "Erratum: Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran (Renew. Sustain. Energy Rev. (2015) 48 (571-584))," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, Elsevier Ltd, p. 1323, Sep. 01, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.04.009.
- [2] S. Feng, L. Xiao, Z. Ge, L. Yang, X. Du, and H. Wu, "Parameter analysis of atomized droplets sprayed evaporation in flue gas flow," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 129, pp. 936-952, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.023.
- [3] F. Xuening, C. Lei, D. Yuman, J. Min, and F. Jinping, "CFD modeling and analysis of brine spray evaporation system integrated with solar collector," *Desalination*, vol. 366, pp. 139-145, 2015, doi: 10.1016/j.desal.2015.02.027.
- [4] Y. Ikegami, H. Sasaki, T. Gouda, and H. Uehara, "Experimental study on a spray flash desalination (influence of the direction of injection)," *Desalination*, vol. 194, no. 1-3, pp. 81-89, 2006, doi: 10.1016/j.desal.2005.10.026.
- [5] C. Shi et al., "Experimental and numerical investigation on the evaporation performance of a cyclone-type spray desalination chamber," *Desalination*, vol. 467, no. January, pp. 125-135, 2019, doi: 10.1016/j.desal.2019.06.012.



- [6] C. Ji, N. Wang, Z. Cui, and L. Cheng, "Role and influence of characteristic Jakob number in high-temperature and high-pressure flash evaporation process," *CIESC J.*, no. 10, p. 16, 2016.
- [7] H. T. Shin, Y. P. Lee, and J. Jurng, "Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 439–454, 2000, doi: 10.1016/S1359-4311(99)00035-6.
- [8] Q. Chen, K. J. M. Y. Li, and K. J. Chua, "Experimental and mathematical study of the spray flash evaporation phenomena," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 598–610, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.018.
- [9] R. D. Grisso, S. Askew, and D. S. McCall, "Nozzles: selection and sizing," 2019.
- [10] P. Phairote, T. Plookphol, and S. Wisutmethangoon, "Design and Development of a Centrifugal Atomizer for Producing Zinc Metal Powder," *Int. J. Appl. Phys. Math.*, vol. 2, no. 2, pp. 77–82, 2012, doi: 10.7763/ijapm.2012.v2.58.
- [11] M. Ahmed and M. S. Youssef, "Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 107, pp. 149–157, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.12.004.
- [12] J. Liu, Q. Yu, and Q. Guo, "Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 73, pp. 44–50, 2012.
- [13] K. R. J. Ellwood, J. L. Tardiff, and S. M. Alaie, "A simplified analysis method for correlating rotary atomizer performance on droplet size and coating appearance," *J. Coatings Technol. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 303–309, 2014.
- [14] T. Collins, "ImageJ for Microscopy. *BioTechniques*, 43," S25–S30. <http://dx.doi.org/10.2144/000112517>, 2007.
- [15] M. Salyani and R. D. Fox, "Performance of image analysis for assessment of simulated spray droplet distribution," *Trans. ASAE*, vol. 37, no. 4, pp. 1083–1089, 1994.

## Evaluation of a Rotary Cup Atomizer and Droplet Production for Use in Desalination Systems

Shahdad Kamfiroozi<sup>1</sup>, Shiva Gorjian<sup>2\*</sup>, Barat Ghobadian<sup>3</sup>

1. Student, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.
3. Professor, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

### Abstract

One of the sources of water supply in drought conditions is the use of saline water. Therefore, desalination is one of the oldest technologies that humans have used to purify saline water in the world. In recent years, spray evaporation technology has been proposed to dispose of wastewater with high salinity in many industrial applications, including desalination of seawater and wastewater treatment due to its advantages of high evaporation rate and lack of brine. Therefore, in this study, according to the need to produce droplets with appropriate quantity and quality and also minimizing the energy consumption for spray evaporation, a rotary cup atomizer with the help of 3D printing technology was designed and evaluated with the help of water-sensitive papers and Image processing using ImageJ software. Evaluation of the cup atomizer made of water-sensitive papers showed that the droplet size more depends on the rotational



speed of the cup. The results indicated that as the rotational speed of the cup atomizer is increased, the diameter of the produced droplets is decreased while their mean diameter becomes more uniform. The evaluation results showed that the cup atomizer made at a rotational speed of 6000 rpm, with minimum energy consumption, had a higher performance of droplet production than other evaluation conditions and the mean droplet diameter was more uniform.

**Key words:** Desalination, Droplet, Rotary cup atomizer, Spray evaporation, Image processing.

\*Corresponding author

E-mail: [gorjian@modares.ac.ir](mailto:gorjian@modares.ac.ir)