

بررسی تجربی آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی - رطوبت زدایی مجهز به جمع کننده ی فتوولتائیک - گرمائی

سید محمد حسن مصطفوی^۱، حمید مرتضی پور^۲، کاظم جعفری نعیمی^۳، محسن شمسی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش مکانیک مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۳- استادیار بخش مکانیک مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۴- دانشیار بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۵ - تاریخ بازنگری: ۱/۹/۱۳۹۶ - تاریخ تصویب: ۲۹/۹/۱۳۹۶)

چکیده

در این تحقیق یک طرح نوین برای شیرین سازی آب شور، با انرژی خورشید پیشنهاد گردید. در آب شیرین کن مورد نظر، از روش رطوبت زنی - رطوبت زدایی برای تبدیل آب شور به قابل شرب استفاده شد. آب شیرین کن ساخته شده شامل تبخیر-کننده ی فتوولتائیک-گرمائی، چگالنده، مخزن های آب شور و شیرین، دمنده ی هوا و پمپ آب بود. ارزیابی سامانه پیشنهادی در سه سطح سرعت هوا (۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه) و سه سطح دبی آب شور عبوری از روی صفحه جاذب فتوولتائیک (۹۴، ۱۸۹ و ۲۸۳ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده) انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که بالاترین بازده تبخیرکننده حدود ۸۰ درصد و بیشینه تبخیر روزانه حدود ۷/۴ کیلوگرم بود که در دبی جریان آب ۱۸۹ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع و سرعت هوای خروجی ۲ متر بر ثانیه مشاهده گردید. بالاترین کارایی چگالنده حدود ۶۱ درصد و بیشینه آب شیرین تولیدشده حدود ۴/۸ کیلوگرم در هر روز بود که در دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع و سرعت هوای خروجی ۱ متر بر ثانیه، به دست آمد. با وجود آنکه دمای کاری پنل فتوولتائیک مرسوم، به طور قابل ملاحظه ای بالاتر (به طور متوسط ۱۸ درجه سلسیوس) از حالت های مختلف جمع کننده ی فتوولتائیک-گرمائی بود، بازده الکتریکی آن، به دلیل دریافت تابش بیشتر خورشید، بیشتر شد.

واژه های کلیدی: آب شیرین، بازده الکتریکی، تبخیرکننده، چگالنده

مقدمه

آب شیرین مورد نیاز جمعیت رو به رشد، از طریق تصفیه ی آب شور اقیانوس، دریا، رودخانه ها یا دریاچه ها است. بسیاری از تجهیزات آب شیرین کن های موجود، گران و انرژی برند. به طور معمول، آب شیرین کن های موجود بر اسمز معکوس^۱ (RO)، تقطیر در خلأ یا ترکیبی از این دو متکی هستند. اسمز معکوس، بیشترین کارایی را برای نمک زدایی در مقیاس بزرگ (حدود ۱/۸ کیلووات ساعت بر مترمکعب) دارد (Cohen-Tanugi & Grossman, 2012). در سال های اخیر، تلاش های زیادی در راستای ارائه طرح های جدید از سامانه های آب شیرین کن، در راستای کاهش هزینه ها و افزایش بهره وری آن ها انجام شده است (Chandrashekara & Yadav, 2017).

تقاضای جهانی انرژی در حال افزایش است و انتظار می رود که مصرف انرژی در جهان، بین سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ بیش از ۳۳ درصد افزایش یابد (Hasanuzzaman et al., 2012).

تقاضا برای تولید پایدار آب شیرین به سرعت در حال افزایش است و نمک زدایی بهترین روش برای تأمین آن می باشد. به طوری که در سال ۲۰۱۵، حدود ۴۰۰ میلیون نفر از آب های نمک زدایی شده استفاده کرده اند و پیش بینی می شود که تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۱۴ درصد از جمعیت جهان مجبور به استفاده از تصفیه آب دریایی گردند (Cohen-Tanugi & Grossman, 2012). در سال ۲۰۱۰ میزان مصرف آب در بخش کشاورزی، صنعت و خانگی ۴۵۰۰ میلیارد متر مکعب بوده است و اما پیش بینی می شود تا سال ۲۰۳۰ این مقدار آب فقط می تواند نیاز بخش کشاورزی را فراهم کند و بشر با کمبود ۲۴۰۰ میلیارد مترمکعب آب در بخش خانگی و صنعت روبه رو خواهد شد (Chandrashekara & Yadav, 2017). بهترین راه برای تأمین

می‌شود و سپس از طریق غشای آروماتیک متخلخل^۷ جریان می‌یابد. فشار بالا یا پتانسیل الکتریکی بر روی بخار آب تولید آب شیرین از آب شور را فراهم می‌سازد (Sharon & Reddy, 2015). این سامانه مصرف انرژی بالایی دارد (Ali et al., 2011). در آب شیرین کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی خورشیدی هوا به‌عنوان سیال عامل و بر اساس اصل نفوذ جرم توسط همرفت طبیعی و یا اجباری (با استفاده از دمنده) بین واحد تبخیرکننده و چگالنده گردش پیدا می‌کند (Narayan et al., 2010). اصل عملیات بر اساس تبخیر آب و تقطیر بخار از هوا مرطوب است (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2013). آب شیرین کن خورشیدی رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی به‌طور معمول از آب گرم کن خورشیدی^۸ (SWH)، مخزن ذخیره آب گرم^۹ (HWST)، رطوبت ساز^{۱۰} (اتاق تبخیری) (H) و دستگاه‌های رطوبت‌گیر^{۱۱} (چگالنده) (DH) تشکیل می‌شود. می‌توان از گرم کن خورشیدی هوا^{۱۲} (SAH) قبل از ورود به رطوبت ساز، استفاده کرد (Shalaby et al., 2017). در پژوهشی یک دستگاه ترکیبی آب گرم کن-آب شیرین کن خورشیدی بر پایه فرآیند رطوبت زنی-رطوبت زدایی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق گزارش شد که دستگاه قادر به تولید ۲۰ لیتر آب شیرین و بیش از ۳۰۰ لیتر آب گرم در دمای ۵۰ تا ۵۵ درجه سلسیوس در روز (معادل نیاز معمول یک خانوار ۴ نفره) بود (Zamen, 2015). اثر دمای هوا بر بهره‌وری آب شیرین کن رطوبت‌زنی- رطوبت‌زدایی خورشیدی ناچیز است. بنابراین، استفاده از گرم کن خورشیدی هوا در این نوع آب شیرین کن توصیه نمی‌شود (Kabeel et al., 2014). از آنجاکه عملکرد آب شیرین کن‌های نوع رطوبت زنی-رطوبت زدایی تا حدود زیادی تحت تأثیر دمای آب ورودی است، می‌توان از گرمای پنل‌های فتوولتائیک (سامانه‌های فتوولتائیک-گرمائی) برای گرم کردن آب ورودی به این نوع آب شیرین کن‌ها استفاده کرد (Giwa et al., 2016). بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که سامانه‌های فتوولتائیک-گرمائی در مقایسه با انواع فتوولتائیک تکی (مرسوم) دارای توجیه اقتصادی بالاتری می‌باشند (Tyagi et al., 2012). نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که آب گرم کن خورشیدی فتوولتائیک-گرمائی، به طور متوسط توانائی تولید روزانه ۲/۳ کیلووات ساعت انرژی حرارتی به ازای هر مترمربع از سطح جمع‌کننده را در شهر

ساخت یک سامانه تولید انرژی با آلودگی کم، استفاده از نیروگاه‌هایی با سوخت فسیلی، شامل: زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی، باید محدود شوند و انرژی‌های تجدید پذیر که از منابع طبیعی و ذاتی موجود با هزینه‌ی پایین و کم‌ترین تأثیر بر محیط‌زیست به دست می‌آیند، برای تولید برق و گرمای پاک اجرا گردند. از طرفی، در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدید پذیر، تابش مستقیم خورشید، به‌خصوص در مناطق گرمسیری، دارای پتانسیل بسیار بالایی است (Thole, 2013). فرآیند شیرین کردن آب خورشیدی به‌طور معمول به دودسته‌ی عمده، سامانه‌های غیرمستقیم شامل آب شیرین کن رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی خورشیدی^۱ (HDHSDS)، تقطیر غشایی^۲ (MD)، آبشار خورشیدی، تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای^۳ (MSF)، تقطیر چندمرحله‌ای^۴ (MED)، تراکم بخار^۵ (VC) و روش مستقیم به دودسته فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند (Shatat et al., 2013). در روش مستقیم، آب مقطر به‌طور مستقیم در جمع‌کننده‌های خورشیدی تولید و تبخیر و اتاق‌های تراکم یکپارچه می‌شوند که خورشیدی تقطیر مستقیم نامیده^۶ می‌شود (Qiblawey & Banat, 2008). روش غیرمستقیم نمک‌زدایی خورشیدی، شامل دو بخش جمع‌کننده‌ی خورشیدی و واحد نمک‌زدایی هست. انواع مختلفی از جمع‌کننده‌های خورشیدی مانند صفحه- صاف، لوله‌های خلاً، لوله‌های حرارتی و غیره می‌تواند همراه با فرایندهای شیرین‌کننده حرارتی مانند تقطیر غشایی، تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای، تراکم بخار، تبخیر چندمرحله‌ای مورد استفاده قرار گیرد (Shatat et al., 2013). در تحقیقی بیان گردید که با اتصال مجموعه‌ی تقطیر ناگهانی چندمرحله‌ای و تبخیر چندمرحله‌ای به متمرکز کننده‌های خورشیدی، می‌توان هزینه‌های مصرف سوخت فسیلی را کاهش داد و طرح ارائه‌شده برای تأمین آب شیرین موردنیاز در سطح جامعه کوچک مناسب بود (Chandrashekhara & Yadav, 2017). نتایج تحقیقی نشان می‌دهد که با استفاده از حرارت اتلافی آب برگشتی سامانه خنک‌کننده در نیروگاه‌های مجاور دریا، می‌توان به‌میزان ۱۳ درصد هزینه‌ی تمام شده‌ی هر متر مکعب آب شیرین تولیدی توسط آب شیرین کن تقطیر ناگهانی چند مرحله- ای را کاهش داد (Akbari et al., 2016). در فرآیند تقطیر غشایی، آب ورودی به‌وسیله‌ی جمع‌کننده‌های خورشیدی گرم

7 . porous hydrophobic membrane

8 . Solar water heater

9 . Hot water storage tank

10 . Humidifier

11 . Dehumidifier

12 . Solar air heater

1 . Humidification - Dehumidification solar desalination systems

2 . Membrane Distillation

3 . Multi-Stage Flash

4 . Multi-Effect Distillation

5 . Vapor Compression

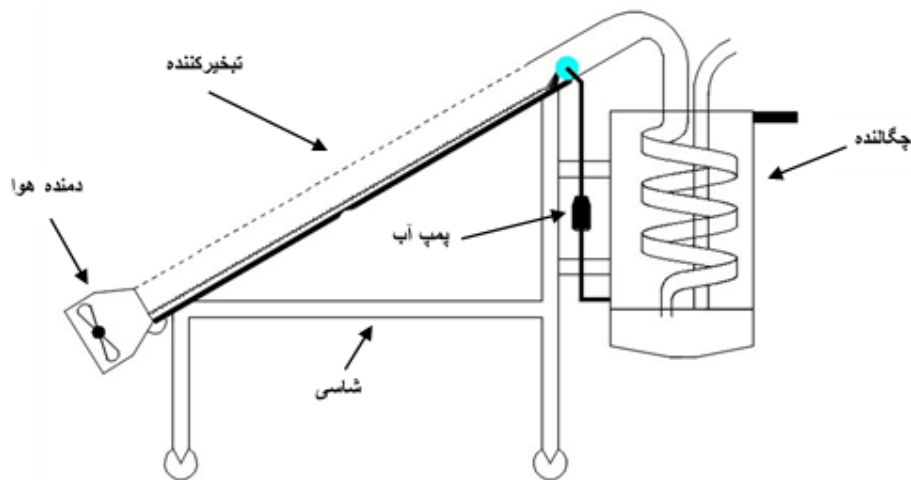
6 . Solar still

اصلی این پژوهش، بررسی اثر تغییر سرعت هوا و دبی آب شور عبوری از داخل سامانه بر عملکرد اجزای مختلف آب شیرین کن پیشنهادی بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات سامانه آب شیرین کن خورشیدی

طرح‌واره‌ای از آب شیرین کن خورشیدی موردنظر تحقیق حاضر، در شکل ۱ آورده شده است. این سامانه شامل شاسی، چگالنده، تبخیرکننده، دمنده هوا و پمپ آب می‌باشد. هوای محیط به وسیله دمنده، از داخل تبخیرکننده که یک جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی است عبور داده می‌شود. در این واحد، جریان آب به صورت آبشاری از روی صفحه‌ی جاذب نور فتوولتائیک می‌گذرد و با جذب گرمای آن تبخیر می‌گردد. بخار تشکیل شده، در ادامه، به وسیله‌ی جریان هوا به داخل چگالنده هدایت و در آنجا با کاهش دمای آن، تقطیر می‌شود. مشخصات اجزای مختلف آب شیرین کن پیشنهادی در ذیل آورده شده است.



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از سامانه آب شیرین کن خورشیدی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی مجهز به صفحه جاذب فتوولتائیک-گرمائی

تبخیرکننده مورد استفاده در تحقیق، یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمائی با دو جریان مخالف هوا و آب بود (شکل ۲-ج). در ورودی این بخش یک دمنده گریز از مرکز با جریان مستقیم نصب گردید. توان مورد نیاز دمنده از یک باتری ۱۲ ولت که به وسیله‌ی صفحه فتوولتائیک به کاررفته در جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی شارژ می‌شد، تأمین شد. با توجه به ظرفیت تولید آب شیرین مورد نظر، براساس متوسط تابش خورشید در طول روز، گرمای نهان آب و متوسط بازده حرارتی جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمائی با جریان روگذر،

کرمان دارد (Mohammadi Sarduei et al., 2017). بالاترین انتقال حرارت از سطح پنل فتوولتائیک به سیال خنک‌کننده زمانی اتفاق می‌افتد که سیال در تماس کامل با سطح آن باشد. از این رو می‌توان گفت سامانه‌های فتوولتائیک-گرمائی با جریان رو گذر، بازده حرارتی بالاتری نسبت به جریان زیر گذر دارند (van Helden et al., 2004). نتایج ارائه شده در خصوص بررسی و مقایسه عملکرد انواع مختلف جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمائی نشان می‌دهد که نوع با جریان آب روگذر، به لحاظ خنک کاری پنل فتوولتائیک و افزایش بازده الکتریکی آن، دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر انواع است. اما، به دلیل تبخیر آب از سطح جمع‌کننده و اتلاف بخش زیادی از بار حرارتی به وسیله بخار، این جمع‌کننده در آب‌گرم‌کن‌های فتوولتائیک-گرمائی کاربرد چندانی نداشته است (Zondagh et al., 2003). در تحقیق حاضر، به منظور استفاده از مزیت‌های جمع‌کننده‌های فتوولتائیک گرمائی با جریان آب روگذر در تبخیر آب، یک سامانه‌ی آب شیرین کن خورشیدی نوع رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی جدید با جریان هوای اجباری مدنظر قرار گرفت. مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که گزارش‌های چندانی در خصوص استفاده از جریان روگذر پنل فتوولتائیک در آب شیرین‌کن‌ها، در ادبیات پیشین وجود ندارد؛ بنابراین، هدف

تبخیرکننده مورد استفاده در تحقیق، یک جمع‌کننده‌ی خورشیدی فتوولتائیک-گرمائی با دو جریان مخالف هوا و آب بود (شکل ۲-ج). در ورودی این بخش یک دمنده گریز از مرکز با جریان مستقیم نصب گردید. توان مورد نیاز دمنده از یک باتری ۱۲ ولت که به وسیله‌ی صفحه فتوولتائیک به کاررفته در جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی شارژ می‌شد، تأمین شد. با توجه به ظرفیت تولید آب شیرین مورد نظر، براساس متوسط تابش خورشید در طول روز، گرمای نهان آب و متوسط بازده حرارتی جمع‌کننده‌های فتوولتائیک-گرمائی با جریان روگذر،

به صورت آبشاری، در اثر نیروی ثقل، از روی پنل عبور می‌کند و به وسیله لوله‌ی خروجی مخزن جمع‌آوری آب‌شور که در بخش پائین کانال جمع‌کننده نصب شده، به بیرون منتقل می‌گردد.

مستقیم ۱۵ وات (مدل JI500 شرکت روباویکیو در ایران) با ولتاژ کاری ۱۲ ولت، که توسط باتری موجود در سامانه تغذیه می‌گردد، با فشار، به لوله‌ی توزیع منتقل می‌شود و در ادامه،

جدول ۱. مشخصات فنی پنل فتوولتائیک مدل ES-11-12-180

ابعاد (mm)	توان بیشینه (W)	ولتاژ مدار-باز (V)	جریان اتصال- کوتاه (A)	ولتاژ در نقطه توان بیشینه (V)	جریان در نقطه توان بیشینه (A)	بیشینه ولتاژ سامانه (V)
۱۵۸۰×۸۰۸×۴۵	۱۸۰	۴۳/۲	۵/۸۰	۳۵/۶	۵/۰۶	۱۰۰۰

آب در مخزن، یک شناور در ورودی جریان به آن نصب گردید. در این بخش، آب داخل مخزن، قبل از ورود به لوله‌ی توزیع در واحد تبخیرکننده، با دریافت حرارت از لوله‌ی مارپیچ تا حدودی گرم می‌شود. مخزن آب شیرین در پایین مخزن آب ورودی، با یک جداره، قرار داشت و در زیر آن یک شیر و لوله‌ی تخلیه آب شیرین تعبیه شد. به منظور هدایت جریان هوا به خارج از سامانه، یک لوله با قطر ۶۷ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰، بر روی مخزن آب شیرین نصب گردید.

چگالنده مورد استفاده در تحقیق، در شکل ۲- د نشان داده شده است. این بخش شامل مخزن آب ورودی، مخزن آب شیرین، لوله‌ی مارپیچ مبدل حرارت و لوله‌ی خروجی جریان هوا بود. لوله‌ی مارپیچ استفاده شده دارای قطر ۸۰ میلی‌متر و طول مفید ۱۳۰۰ میلی‌متر بود که به صورت قائم در داخل مخزن آب ورودی نصب گردید. ابتدای آن به خروجی تبخیرکننده و انتهای آن به مخزن آب شیرین متصل شد. جریان هوای حمل‌کننده‌ی بخار آب، پس از عبور از تبخیرکننده، وارد لوله‌ی مارپیچ مبدل حرارت می‌گردد و در آنجا با تبادل گرما با آب تازه و خنک ورودی، دمای آن کاهش می‌یافت. در نتیجه‌ی این فرایند، بخشی از بخار آب موجود در جریان هوا، چگالیده و به صورت قطره‌های آب بر روی سطح لوله‌ی مبدل حرارت، در اثر نیروی جاذبه، به سمت پائین جاری می‌شود. برای کاهش انتقال حرارت مخزن به محیط، جداره‌ی بیرونی آن با پشم شیشه به ضخامت ۵ سانتی-متر، به طور کامل پوشانده شد. به منظور ثابت نگه داشتن سطح

روش انجام آزمایش

ارزیابی تجربی سامانه‌ی آب شیرین کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی خورشیدی طراحی شده در آزمایشگاه انرژی خورشیدی بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان، در اردیبهشت و خردادماه سال ۹۶ انجام شد.



ب



الف



ه



د



ج

شکل ۲. الف و ب) نمای کلی از دستگاه، ج) تبخیرکننده، د) چگالنده و ه) نمای روبه‌رو از آب شیرین کن خورشیدی فتوولتائیک-گرمائی و مرسوم

که در آن ζ_{co} کارایی چگالنده (%)، ω_{co} و ω_a به ترتیب رطوبت مطلق هوای خروجی چگالنده و محیط (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک) هستند. برای محاسبه‌ی بازده الکتریکی جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی، از رابطه‌ی ۵ استفاده شد (Goetzberger & Hoffmann, 2005).

$$\zeta_{el} = \frac{P_m}{A_c \times I_t} \times 100 \quad (\text{رابطه‌ی ۵})$$

که در آن ζ_{el} بازده الکتریکی (%)، P_m توان تولیدی پنل فتوولتائیک می‌باشند. توان تولیدی پنل فتوولتائیک از رابطه‌ی ۶ محاسبه شد (Skoplaki & Palyvos, 2009).

$$P_m = V_m \times I_m = (FF) V_{oc} \times I_{sc} \quad (\text{رابطه‌ی ۶})$$

که در آن V_m بیشینه اختلاف پتانسیل الکتریکی (V)، I_m بیشینه شدت جریان الکتریکی (A)، (FF) فیل فاکتور، V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه می‌باشند.

برای اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف از حسگرهای دمای مدل SMT 160 متصل به یک ترانسیمتر مدل TM 1323 (ساخت شرکت مهندسی تیکا در ایران) استفاده گردید. یک سولاریمتر (مدل TES 1333 ساخت شرکت TES تایوان)، برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشید، در کنار جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی نصب شد. به منظور تعیین رطوبت نسبی از رطوبت‌سنج‌های مدل SUN25H شرکت مهندسی سانوارد ساخت ایران، استفاده گردید. از یک سرعت‌سنج هوایی پره‌ای (مدل BE816A، شرکت BESTONE، ساخت هنگ‌کنگ) برای اندازه‌گیری سرعت هوای خروجی از لوله‌ی تخلیه‌ی هوا استفاده شد. اختلاف پتانسیل، شدت جریان و توان الکتریکی پنل فتوولتائیک، با استفاده از یک سولار آنالایزر (مدل 200 PROVA ساخت کشور تایوان) تعیین گردیدند.

نتایج و بحث

شکل ۱ تغییرات میانگین رطوبت نسبی هوا و دمای محیط در طی زمان انجام آزمایش‌ها از ساعت ۹:۰۰ صبح تا ۱۵ عصر را نشان می‌دهد. رطوبت نسبی هوا در ساعت ۹:۰۰ حدود ۷ درصد و کمینه آن در ساعت ۱۵ عصر حدود ۴/۲ درصد بود. بیشترین تغییرات دمای محیط در مدت انجام آزمایش، در محدوده‌ی ۲۷ تا ۳۷ درجه‌ی سلسیوس بود که بیشترین مقدار آن در ساعت ۱۵ عصر مشاهده گردید.

فاکتورهای آزمایش شامل دبی آب عبوری از روی سطح جمع‌کننده در سه سطح (۹۴، ۱۸۹ و ۲۸۳ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع‌کننده) و سرعت هوای عبوری در سه سطح (۱، ۱/۵ و ۲ متر بر ثانیه) بودند. در هر آزمایش، شدت تابش خورشید بر روی سطح جمع‌کننده، دمای سطح پنل فتوولتائیک-گرمائی و مرسوم در سه نقطه، دما و رطوبت نسبی هوای محیط و خروجی از چگالنده و تبخیرکننده، دمای مخزن آب ورودی، ولتاژ بیشینه، ولتاژ مدار باز، جریان بیشینه و جریان اتصال کوتاه اندازه‌گیری شدند. پارامترهای مورد ارزیابی شامل بازده تبخیرکننده، کارایی چگالنده، بازده الکتریکی پنل فتوولتائیک، تبخیر روزانه تبخیرکننده، مقدار چگالش روزانه در چگالنده بودند که در ادامه نحوه محاسبه هر یک از آن‌ها آورده شده است.

برای محاسبه بازده تبخیرکننده از رابطه‌ی ۱ استفاده گردید (Duffie & Beckman, 2013).

$$\zeta_{ev} = \frac{\dot{Q}_c}{A_c \times I_t} \times 100 \quad (\text{رابطه‌ی ۱})$$

که در آن ζ_{ev} بازده تبخیرکننده (%)، \dot{Q}_c نرخ گرمای مفید جمع‌کننده (W)، I_t تابش خورشید (W.m^{-2}) و A_c سطح جمع‌کننده (m^2) است. نرخ گرمای مفید جمع‌کننده، از رابطه‌ی ۲ تعیین شد (Bahadori et al., 2016).

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_v L_f \quad (\text{رابطه‌ی ۲})$$

که در آن \dot{m}_v نرخ تبخیر آب در جمع‌کننده (kg.s^{-1}) و L_f گرمای نهان تبخیر آب (J.kg^{-1}) است. نرخ تبخیر بر اساس اختلاف رطوبت مطلق هوای ورودی و خروجی از جمع‌کننده، با استفاده از رابطه‌ی ۳ به دست آمد (Bahadori et al., 2016).

$$\dot{m}_v = (\omega_{Eo} - \omega_{Ei}) \rho_a V_a A_t \quad (\text{رابطه‌ی ۳})$$

که در آن ω_{Eo} و ω_{Ei} به ترتیب رطوبت مطلق جریان هوای خروجی و ورودی تبخیرکننده (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک)، ρ_a چگالی هوای خشک عبوری (kg.m^{-3})، V_a و A_t به ترتیب سرعت عبور هوا (m.s^{-1}) و مساحت دهانه لوله‌ی خروجی سامانه (m^2) هستند.

کارایی چگالنده با استفاده از رابطه‌ی ۴ تعیین گردید (Bahadori et al., 2016).

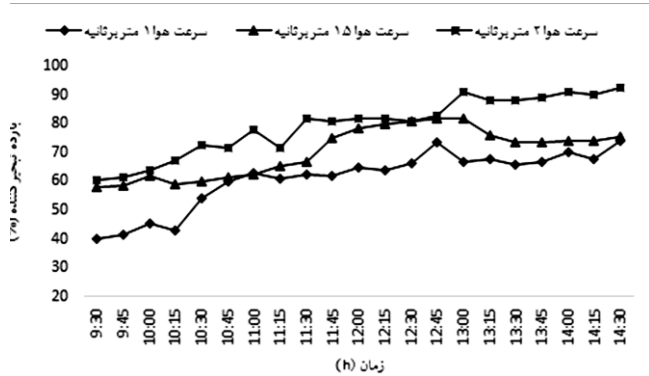
$$\zeta_{co} = \frac{\omega_{Eo} - \omega_{Co}}{\omega_{Eo} - \omega_a} \times 100 \quad (\text{رابطه‌ی ۴})$$

طول روز، بازده تبخیرکننده روندی افزایشی داشت. به‌عنوان مثال، در سرعت هوای ۱ متر بر ثانیه، بازده تبخیرکننده در شروع آزمایش حدود ۳۹ درصد بود درحالی‌که مقدار آن در ساعت ۱۴:۳۰ عصر به بیش از ۷۵ درصد رسید. دلیل این امر، افزایش تدریجی دمای هوا (با افزایش دمای محیط) و آب‌شور ورودی به جمع‌کننده (به خاطر جذب حرارت جریان هوای مرطوب در چگالنده) باگذشت زمان در طول روز است که بهبود نرخ تبخیر آب را به دنبال دارد.

جدول ۱. نتایج تجزیه واریانس اثر فاکتورهای آزمایش بر کارایی چگالنده، مقدار تقطیر روزانه، بازده تبخیرکننده و مقدار تبخیر روزانه

مقدار تبخیر	بازده تبخیرکننده	درجه آزادی	منابع خطا
۶۷۹**	۳۸۰/۰۵۸**	۲	دبی آب
۹۷۱**	۸۸۹/۳۹۰**	۲	سرعت هوا
۲۵۵**	۸۷/۱۱۵*	۴	دبی آب × سرعت هوا
۰/۰۰۶	۲۶/۴۷۹	۱۸	خطا
		۲۶	کل

* و ** به ترتیب معنی‌داری در احتمال ۵ و ۱ درصد



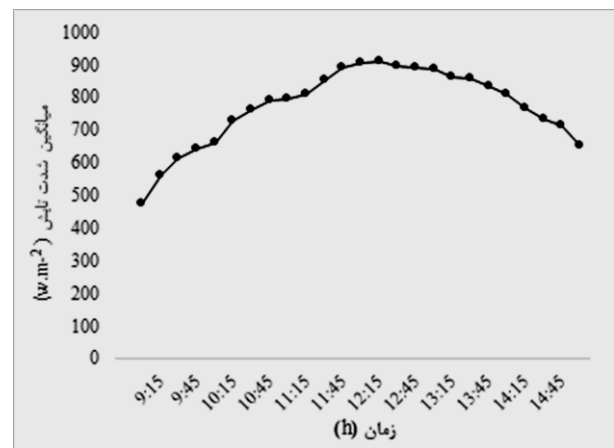
شکل ۳. تغییرات بازده حرارتی تبخیرکننده در طول روز

شکل ۴ تغییرات بازده تبخیرکننده در شرایط مختلف دبی آب عبوری و سرعت هوای ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح است که با افزایش سرعت هوا، بازده تبخیرکننده افزایش می‌یابد. به طوری که می‌توان گفت بالا بردن سرعت هوا از ۱ به ۲ متر بر ثانیه، به‌طور میانگین، موجب بهبود ۳۷ درصدی بازده تبخیرکننده گردید. دلیل این امر آن است که ضریب‌های انتقال حرارت و انتقال جرم با افزایش سرعت هوای عبوری از جمع‌کننده افزایش می‌یابد که بهبود نرخ تبخیر از سطح آب را به دنبال دارد. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که با افزایش دبی آب عبوری از ۹۴ به ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع، بازده تبخیرکننده اندکی افزایش یافت و پس‌از آن با بالا بردن دبی تا



شکل ۱. تغییرات دما و رطوبت نسبی در طول روز

شکل ۲ تغییرات میانگین شدت تابش خورشید در مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها از ساعت ۹ صبح تا ۱۵ عصر را نشان می‌دهد. بیشینه‌ی تابش خورشید در ساعت ۱۲:۱۵ برابر ۹۰۹ وات بر مترمربع و کمینه آن در ساعت ۹ صبح حدود ۴۷۵ وات بر مترمربع بود.



شکل ۲. تغییرات میانگین شدت تابش در طول روز

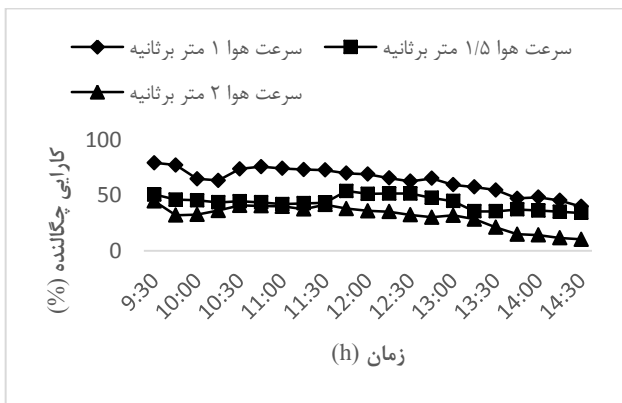
نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر صفتهای مورد مطالعه در تحقیق (شامل: مقدار تقطیر روزانه، کارایی چگالنده، مقدار تبخیر روزانه و بازده تبخیرکننده) در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به جدول، مشخص است که فاکتورهای آزمایش و اثر دوگانه آن‌ها تأثیر معناداری، در سطح ۱ درصد دارند. در ادامه چگونگی اثرگذاری هر یک از عامل‌های مورد بررسی و مقایسه میانگین اثرات متقابل آن‌ها بر صفتهای مورد نظر، آورده شده است.

بررسی بازده تبخیرکننده

تغییرات بازده حرارتی تبخیرکننده در طول روز، در دبی آب ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع و سرعت‌های مختلف عبور هوا، در شکل ۳ آورده شده است. به‌طور واضح، باگذشت زمان در

بررسی کارایی چگالنده

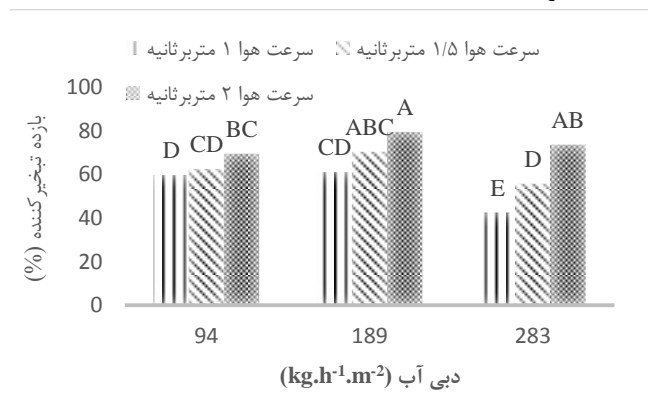
شکل ۶، تغییرات کارایی چگالنده در طول روز در دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع کننده را نشان می‌دهد. به‌طور واضح، در روزهای مختلف، کارایی چگالنده در ابتدای صبح بالا بوده و به تدریج با گذشت زمان، کاهش یافته است. از آنجا که چگالنده‌ی استفاده شده در تحقیق حاضر از نوع تماس غیر مستقیم (عدم وجود تماس بین جریان هوای مرطوب و مایع رطوبت‌گیر) می‌باشد، دمای آب‌شور داخل چگالنده، به‌عنوان جاذب حرارت از جریان هوا، اثر قابل توجهی در نرخ چگالش دارد. بنابراین، در ساعات‌های اولیه‌ی آزمایش که مخزن دارای پایین‌ترین دما بوده، بالاترین کارایی چگالنده به دست آمده است اما با افزایش تدریجی دمای آب، به دلیل جذب حرارت از جریان هوا و افزایش تدریجی دمای آب‌شور ورودی به چگالنده (به دلیل گرم‌تر شدن محیط)، کارایی چگالنده دچار افت گردید.



شکل ۶. تغییرات کارایی چگالنده در طول روز در دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع جمع کننده

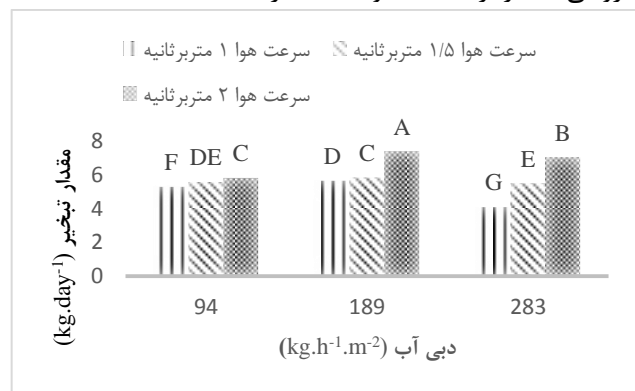
شکل ۷ تغییرات کارایی چگالنده در شرایط مختلف دبی آب عبوری و سرعت هوای خروجی را نشان می‌دهد. مقدار بخار موجود در جریان هوا، نرخ تبادل حرارت و مدت زمان عبور هوا از داخل چگالنده، از عوامل مؤثر بر کارایی آن هستند (Tabrizi et al., 2016). لذا، می‌توان انتظار داشت در شرایط یکسان دمای آب‌شور داخل چگالنده و رطوبت نسبی هوای عبوری، افزایش سرعت هوا کاهش کارایی چگالنده را به دنبال داشته باشد. این نکته به سادگی از مقایسه‌ی شکل‌های ۴ و ۷ قابل استنباط است. از طرفی، در سرعت ثابت هوا و وجود بخار یکسان، افزایش دبی آب‌شور منجر به افزایش سرعت آب در چگالنده شده، بنابراین چگالنده در دمای پایین‌تری قرار گرفته که این خود باعث افزایش کارایی چگالنده شده است. جهانشاهی جواران و همکاران در تحقیقی اثر سه دبی آب ورودی ۲/۴، ۷/۲ و ۱۲ لیتر بر دقیقه را بر کارایی چگالنده، بررسی کردند. نتایج نشان

۲۸۳ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع، بازده دچار افت شد. به نظر می‌رسد در دبی ۹۴ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع، جریان آب عبوری از داخل جمع‌کننده، سطح پنل را به‌طور کامل نمی‌پوشاند. با بالا بردن دبی تا ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع، سطح پوشش پنل و به‌عبارت‌دیگر سطح تبادل حرارت بین جریان آب و صفحه‌ی گرم جاذب نور خورشید افزایش می‌یابد. این امر بهبود نسبی نرخ تبخیر و بازده تبخیرکننده را به دنبال دارد. افزایش بیشتر دبی آب عبوری، علاوه بر افزایش سرعت، موجب بیشتر شده ضخامت لایه‌ی آب موجود بر روی پنل بدون تغییر سطح تماس می‌شود. بنابراین، به دلیل افزایش مقاومت حرارتی لایه‌ی آب با بالا رفتن ضخامت و دمای پائین تر آن، نرخ تبخیر تا حدودی کاهش یافته است. در مجموع بالاترین بازده تبخیرکننده حدود ۸۰ درصد بود که در سرعت هوای عبوری ۲ متر بر ثانیه و دبی آب ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع مشاهده گردید.



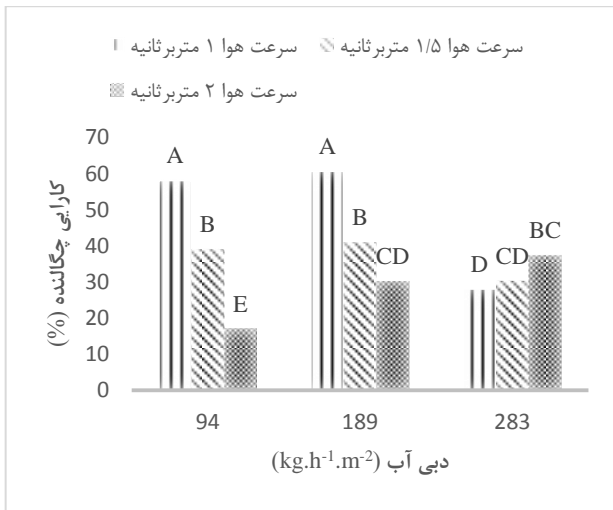
شکل ۴. تغییرات بازده تبخیرکننده در شرایط مختلف آزمایش

شکل ۵ تغییرات مقدار تبخیر روزانه در شرایط مختلف دبی جریان آب عبوری و سرعت هوای خروجی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که تغییرات مقدار تبخیر روزانه متناسب با بازده تبخیرکننده بود و بیشینه تبخیر روزانه در دبی جریان آب ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع و سرعت هوای خروجی ۲ متر بر ثانیه، حدود ۷/۴ لیتر به دست آمد.



شکل ۵. تغییرات مقدار تبخیر روزانه در شرایط مختلف آزمایش

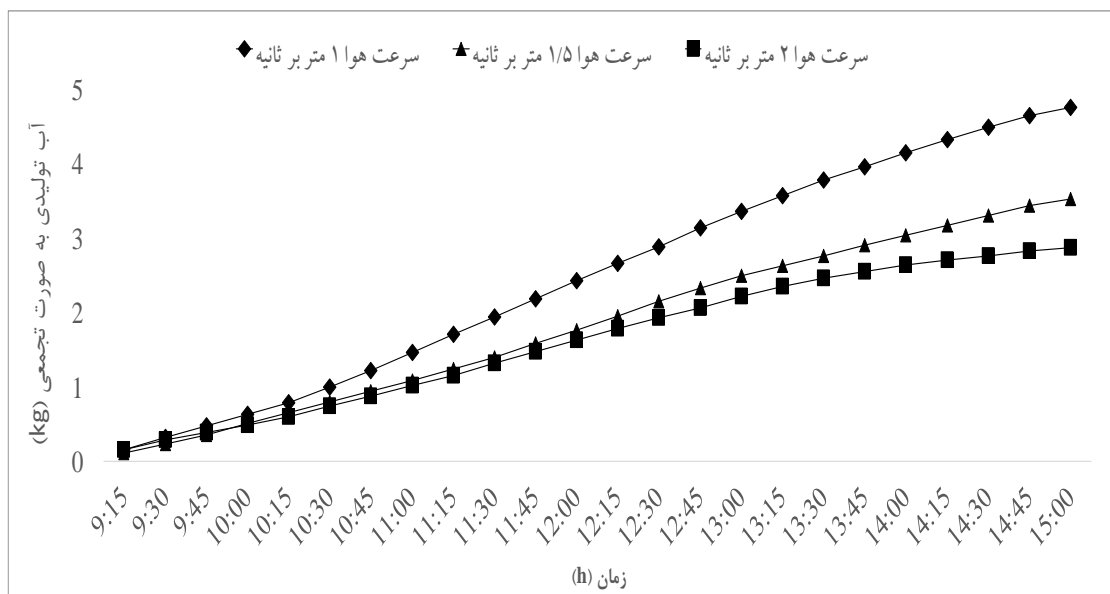
در شکل ۹ مقدار چگالش یا به عبارت دیگر مقدار تولید روزانه‌ی آب شیرین در شرایط مختلف آزمایش، نشان داده شده است. از مقایسه‌ی شکل‌های ۷ و ۹ می‌توان به سادگی ارتباط مستقیم کارایی چگالنده و مقدار چگالش روزانه را متوجه شد. با توجه به شکل، مقدار تولید آب شیرین توسط دستگاه مورد بررسی در این تحقیق، در شرایط مختلف آزمایشی بین ۱/۹۰ تا ۴/۸ لیتر در هر روز به دست آمد که بالاترین مقدار آن مربوط به تیماری با دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده و سرعت هوای خروجی ۱ متر بر ثانیه بود.



شکل ۷. تغییرات کارایی چگالنده در شرایط مختلف آزمایش

داد با افزایش دبی آب، مقدار انتقال حرارت بین آب و هوا افزایش پیدا کرد و این امر باعث کاهش دمای هوای خروجی چگالنده و افزایش رطوبت گیری در آن گردید (Javaran *et al.*, 2016). طبق رابطه‌ی تعریف کارایی چگالنده، رطوبت هوای ورودی به آن، که به بازده تبخیرکننده وابسته است، هم در صورت و هم در مخرج کسر ظاهر می‌شود. از این رو، در شرایط ثابت سرعت هوا و دمای مخزن چگالنده، با افزایش بازده تبخیرکننده، کارایی چگالنده رفتارهای مختلفی را داشته است. در مجموع بالاترین کارایی چگالنده حدود ۶۱ درصد بود که در دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده و سرعت هوای خروجی ۱ متر بر ثانیه به دست آمد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که چگالنده استفاده شده در طرح حاضر، در بهترین حالت تنها قادر است ۶۱ درصد از بخار آب در دسترس را به آب شیرین تبدیل کند و ۳۹ درصد از بخار آب، همراه با جریان هوا به بیرون منتقل می‌شود.

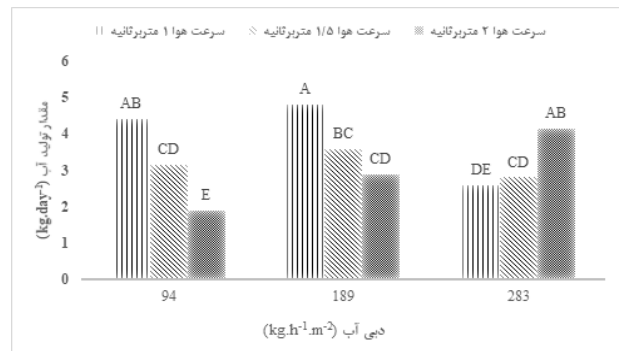
در شکل ۸ مقدار تجمعی چگالش با گذشت زمان در دبی ۱۸۹ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده و در سرعت‌های مختلف هوا، نشان داده شده است. به نظر می‌رسد، در میانه روز، به دلیل بالا بودن شدت تابش خورشید و دمای سطح پنل فتوولتائیک، نرخ چگالش آب تا حدودی بالاتر از صبح و عصر بوده است. به طور میانگین، بالاترین نرخ چگالش، حدود ۱۲/۴ گرم بر دقیقه بود که در ساعت ۱۲ ظهر مشاهده گردید و کمترین مقدار آن حدود ۵ گرم بر دقیقه، در ساعت ۳ عصر بود.



شکل ۸. مقدار تولید روزانه‌ی آب شیرین به صورت تجمعی در دبی ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده

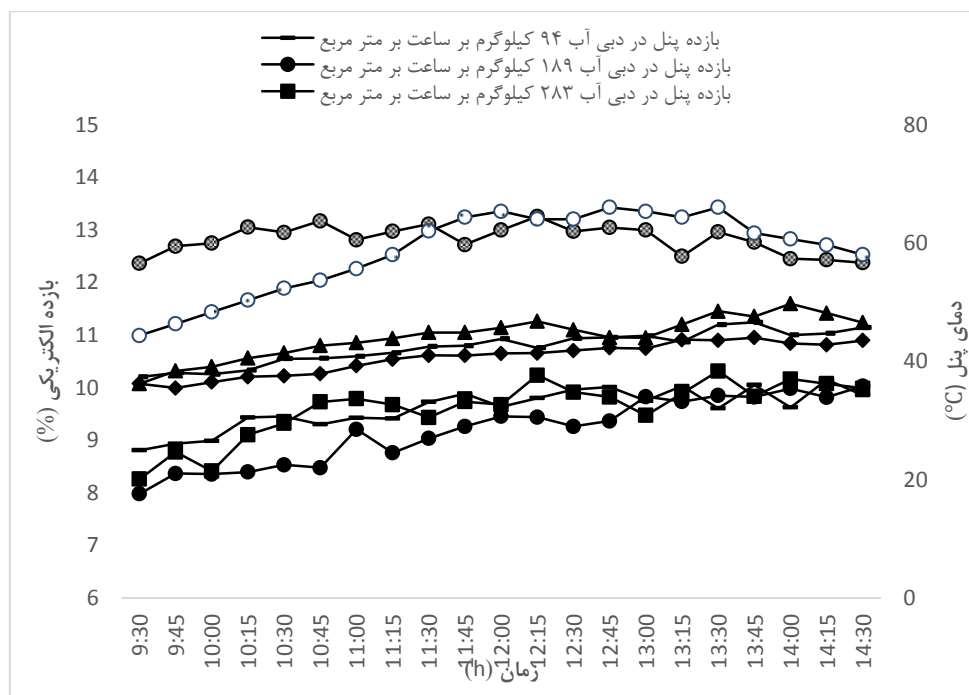
کاهش دمای کاری سلول فتوولتائیک، موجب بهبود بازده الکتریکی آن می‌شود (Sahay et al., 2015). این امر دلیل افزایش نسبی بازده الکتریکی با بالا بردن دبی از ۱۸۹ به ۲۸۳ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده است. اما، برعکس، هنگام افزایش دبی از ۹۴ به ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده، بازده الکتریکی افت کرد. دلیل این امر می‌تواند کاهش جذب نور خورشید توسط پنل به دلیل افزایش پوشش سطح آن با آب شور باشد.

شکل ۱۰ همچنین مقایسه بین دما و بازده الکتریکی پنل فتوولتائیک تنها (حالت مرسوم) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دمای کاری سلول در نوع مرسوم، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از حالت‌های مختلف جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی است. این امر به عبور جریان آب، به‌عنوان سیال خنک‌کننده از روی سطح پنل در انواع فتوولتائیک-گرمائی برمی‌گردد. باوجود دمای کاری بالاتر پنل مرسوم، بازده الکتریکی آن در مقایسه با نوع فتوولتائیک-گرمائی بیشتر بود. دلیل این امر، جذب و بازتاب بخشی از تابش رسیده به سطح جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی به‌وسیله‌ی پوشش پلی کربنات و جریان آب عبوری می‌باشد که موجب کاهش دریافت نور توسط سطح پنل می‌گردد. در مجموع بالاترین بازده الکتریکی مشاهده‌شده در جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی حدود ۱۰/۲۳ در صد و در نوع مرسوم حدود ۱۲/۸۲ بود.



شکل ۹. مقدار تولید روزانه‌ی آب شیرین در شرایط مختلف آزمایش

بررسی عملکرد الکتریکی جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی در شکل ۱۰ تغییرات دمای میانگین و بازده الکتریکی پنل فتوولتائیک، در دبی‌های مختلف آب عبوری از روی آن و سرعت هوای خروجی ۲ متر بر ثانیه مشخص شده است. از عوامل مؤثر بر بازده الکتریکی یک جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی، دمای کاری پنل و مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح آن هستند. با توجه به شکل، با افزایش دبی از ۹۴ به ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده، به دلیل افزایش پوشش سطح پنل با جریان آب (همان‌گونه که در بخش بررسی بازده تبخیرکننده بیان گردید) و در نتیجه افزایش سطح تبادل حرارت، دمای پنل کاهش می‌یابد. افزایش بیشتر دبی آب تا ۲۸۳ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع کننده نیز موجب افزایش سرعت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت آن گردیده که کاهش بیشتر دمای پنل را به دنبال داشته است.



شکل ۱۰. مقایسه بین دما و بازده الکتریکی جمع‌کننده فتوولتائیک-گرمائی و پنل فتوولتائیک تنها

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد یک سامانه‌ی آب‌شیرین‌کن خورشیدی نوع رطوبت‌زنی-رطوبت‌زایی جدید با جریان هوای اجباری و بهره‌گیری از جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی مورد بررسی قرار گرفت.

آزمایش‌های مربوط به ارزیابی سامانه موردنظر، در ۳ سرعت هوا و دبی آب مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق به‌طور خلاصه عبارت‌اند از:

الف) بالاترین بازده تبخیرکننده حدود ۸۰ درصد بود که در سرعت هوای عبوری ۲ متر بر ثانیه و دبی آب ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع‌کننده مشاهده گردید.

ب) بیشینه تبخیر روزانه در دبی جریان آب ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع‌کننده و سرعت هوای خروجی ۲ متر بر ثانیه، حدود ۷/۴ لیتر به دست آمد.

ج) بالاترین کارایی چگالنده حدود ۶۱ درصد بود که در دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع‌کننده و سرعت هوای خروجی ۱ متر بر ثانیه به دست آمد. د) مقدار تولید آب شیرین توسط دستگاه مورد بررسی در این تحقیق، در شرایط مختلف آزمایشی بین ۱/۹ تا ۴/۸ لیتر در هرروز به دست آمد که بالاترین مقدار آن مربوط به تیماری با دبی آب عبوری ۱۸۹ کیلو گرم بر ساعت بر متر مربع سطح جمع‌کننده و سرعت هوای خروجی ۱ متر بر ثانیه بود.

ه) دمای کاری سلول در نوع مرسوم، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر (به‌طور متوسط 18°C) از حالت‌های مختلف جمع‌کننده‌ی فتوولتائیک-گرمائی است باوجود دمای کاری بالاتر پنل مرسوم، بازده الکتریکی فتوولتائیک-گرمائی حدود ۱۰/۲۳ درصد و در نوع مرسوم حدود ۱۲/۸۲ مشاهده شد.

REFERENCES

- Akbari, A., gholinezhad, M., pourali, O. & amidpour, M. (2016). Two-objective optimization of heat recovery and desalinated water production from a once-through cooling system. *Sharif: Mechanical Engineering*, 32(3), 137-147. (In farsi)
- Al-Karaghoul, A. & Kazmerski, L. L. (2013). Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 343-356.
- Ali, M. T., Fath, H. E. & Armstrong, P. R. (2011). A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 4187-4199.
- Bahadori, M. N., Deghani-Sanij, A. & Sayigh, A., (2016). *Wind Towers*. Springer, Place: Published.
- Chandrashekar, M. & Yadav, A. (2017). Water desalination system using solar heat: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1308-1330.
- Cohen-Tanugi, D. & Grossman, J. C. (2012). Water desalination across nanoporous graphene. *Nano letters*, 12(7), 3602-3608.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A., (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, Place: Published.
- Giwa, A., Fath, H. & Hasan, S. W. (2016). Humidification-dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (PV-HDH) for small-scale sustainable water and power production. *Desalination*, 377, 163-171.
- Goetzberger, A. & Hoffmann, V. U., (2005). *Photovoltaic solar energy generation*. Springer Science & Business Media, Place: Published.
- Hasanuzzaman, M., Rahim, N., Hosenuzzaman, M., Saidur, R., Mahbulul, I. & Rashid, M. (2012). Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4527-4536.
- Jahanshahi Javaran, E., Hossein Khani, A. & Mohammadi, S. M. H. (2016). Manufacturing and simulation of a solar humidification-dehumidification desalination system. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), 239-248. (In Farsi)
- Kabeel, A., Hamed, M. H., Omara, Z. & Sharshir, S. (2014). Experimental study of a humidification-dehumidification solar technique by natural and forced air circulation. *Energy*, 68, 218-228.
- Zamen, M., Rezakhani, N., Rejabi, M. & Zeinali Danaloo, M. Al. A. (2015). Performance Evaluation of the Hybrid System of Domestic Solar Water Heater /Desalination System. *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 34(3), 91-102. (In Farsi)
- Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M. & Antar, M. (2010). The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1187-1201.
- Qiblawey, H. M. & Banat, F. (2008). Solar thermal desalination technologies. *Desalination*, 220(1-3), 633-644.
- Sahay, A., Sethi, V., Tiwari, A. & Pandey, M. (2015). A review of solar photovoltaic panel cooling systems with special reference to Ground coupled central panel cooling system (GC-CPCS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 306-312.
- Mohammadi Sarduei, M., Morteza pour, H. & Naeimi, K. J. (2017). Numerical analysis of using hybrid photovoltaic-thermal solar water heater in Iran.

- Journal of Agricultural Machinery*, 7(1), 221-233. (In Farsi)
- Shalaby, S., Bek, M. & Kabeel, A. (2017). Design Recommendations for Humidification-dehumidification Solar Water Desalination Systems. *Energy Procedia*, 107, 270-274.
- Sharon, H. & Reddy, K. (2015). A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1080-1118.
- Shatat, M., Worall, M. & Riffat, S. (2013) . Opportunities for solar water desalination worldwide. *Sustainable cities and society*, 9, 67-80.
- Skoplaki, E. & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Tabrizi, F. F., Khosravi, M. & Sani, I. S. (2016). Experimental study of a cascade solar still coupled with a humidification–dehumidification system. *Energy Conversion and management*, 115, 80-88.
- Thole, B. 2013. Ground water contamination with fluoride and potential fluoride removal technologies for East and Southern Africa, Perspectives in Water Pollution. InTech.
- Tyagi, V., Kaushik, S. & Tyagi, S. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383-1398.
- van Helden, W. G., van Zolingen, R. J. C. & Zondag, H. A. (2004). PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(6), 415-426.