



## بررسی عملکرد یک دستگاه تولید آب شیرین رطوبت زن - رطوبت زدا متصل به کلکتورهای خورشیدی فتوولتائیک حرارتی

سید محمد امین حسینی، فرامرز سرحدی\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ آذر ۱۳۹۴  
بازنگری: ۶ مرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۱۴ شهریور ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۵ شهریور ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

آب شیرین  
رطوبت زن  
رطوبت زدا  
کلکتور خورشیدی  
فتوولتائیک حرارتی

**چکیده:** مقاله حاضر به بررسی عملکرد یک سیستم تولید آب شیرین رطوبت زن - رطوبت زدا (HDH) متصل به کلکتورهای خورشیدی فتوولتائیک حرارتی (PV/T) پرداخته است. اجزاء اصلی سیستم شامل رطوبت زن، رطوبت زدا و کلکتورهای PV/T می باشد. معادلات حاکم بر مسئله توسط نوشتن بالانس انرژی برای اجزاء مختلف سیستم استخراج و به صورت عددی حل شده است. نتایج شبیه سازی تحقیق حاضر در توافق مناسبی با داده های آزمایشگاهی تحقیقات گذشته می باشد. نتایج مقاله نشان می دهند که برای تامین حداقل انرژی خورشیدی لازم برای کارکرد سیستم به تعداد حداقل ۳ کلکتور PV/T با مساحت سطح کل برابر با  $3/2m^2$  نیاز می باشد. همچنین یک مقدار مطلوبی برای دبی جرمی جریان آب شور و هوا در سیستم ترکیبی وجود دارد که بازده انرژی سیستم را حداکثر می کند. مقادیر مطلوب دبی جرمی آب شور و هوا و بازده حداکثر سیستم به ترتیب برابر  $0/025$  و  $0/03$  کیلوگرم بر ثانیه و  $65\%$  می باشند. علاوه بر این افزایش تعداد کلکتورهای PV/T باعث افزایش تولید آب شیرین و توان الکتریکی خروجی می شود و به دلیل افزایش توان مصرفی پمپاژ از بازده انرژی می کاهد. افزایش دمای آب شور ورودی به خاطر تاثیر منفی آن بر عملکرد رطوبت زدا و کلکتورهای PV/T، باعث کاهش تولید آب شیرین، توان الکتریکی و بازده انرژی می شود.

توسط کلکتورهای خورشیدی تامین کرد. اساس عملکرد یک سیستم HDH تبادل انتقال حرارت و جرم بین جریان آب شور و هوای مرطوب در اجزاء مختلف سیستم است. لذا برای برقراری جریان آب شور و هوا در سیستم نیاز به یک منبع الکتریکی خارجی می باشد. کلکتورهای خورشیدی نوع فتوولتائیک حرارتی<sup>۱</sup> ضمن تامین حرارت ورودی لازم به سیستم HDH می توانند توان الکتریکی لازم برای برقراری جریان آب شور و هوا در سیستم فراهم آورند. یک کلکتور PV/T از ترکیب کلکتور خورشیدی معمولی و مدول فتوولتائیک حاصل می شود. در کلکتور PV/T، مدول فتوولتائیک از خنک سازی سیال عامل بهره می برد لذا بازده الکتریکی آن افت نمی کند و همچنین آن توان الکتریکی لازم برای به چرخش در آوردن سیال عامل در سیستم را تامین می کند. از سوی دیگر به دلیل ترکیب مدول فتوولتائیک و کلکتور خورشیدی در یک سیستم یکپارچه می توان از فضای بهینه نصب نیز بهره برد. تحقیقات تئوری و تجربی متعددی در خصوص ارزیابی عملکرد سیستم های HDH و کلکتورهای PV/T انجام شده است. برای اولین بار ولف در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی مفاهیم و تئوری کارکرد کلکتورهای PV/T را ارائه نمود [۳]. فلورچیتز در سال ۱۹۷۹ توسط یک مدل انتقال حرارت یک بعدی دائمی به مطالعه تئوری عملکرد کلکتورهای PV/T پرداخت و رابطه ای خطی بین بازده فتوولتائیک و دمای عملکرد سیستم به دست آورد [۴]. مدنی و زاکی در سال ۱۹۸۹ یک مجموعه آزمایش روی یک واحد رطوبت زن

### ۱- مقدمه

امروزه نیاز به تامین آب آشامیدنی به سرعت رو به افزایش است. این موضوع در حالی است که منابع آب های شیرین محدود و یا رو به اتمام می باشند. تنها در حدود ۳ درصد از منابع آب های روی کره زمین قابل شرب می باشند. با این حال ۲ درصد از آن به صورت منجمد در یخچال های قطبی واقع بوده و فقط ۱ درصد از آب های شیرین در دسترس بشر قرار دارند [۱]. تولید آب شیرین در جهان سالیانه میزان قابل توجهی از مصرف سوخت های فسیلی را به خود اختصاص می دهد. در کنار هزینه های گزاف مصرف سوخت های فسیلی می توان به تولید گازهای گلخانه ای و آلودگی های زیست محیطی ناشی از آن ها اشاره کرد. جهت تامین انرژی حرارتی لازم برای تولید آب شیرین می توان از انرژی خورشیدی بهره گرفت. متداول ترین و ارزاترین نوع فن آوری نمک زدایی خورشیدی، حوضچه های خورشیدی می باشند. ولی بازده تولید آب شیرین حوضچه های خورشیدی به شدت پایین است. در این میان سیستم های رطوبت زن - رطوبت زدا<sup>۱</sup> در مقیاس کوچک و متوسط نیز می توانند برای تولید آب شیرین در کاربردهای خانگی مورد استفاده قرار گیرند [۲]. سایر فن آوری های نمک زدایی یا در مقیاس صنعتی بوده و یا نیازمند به مقادیر زیاد انرژی ورودی و هزینه های اقتصادی بالا می باشند. انرژی حرارتی ورودی لازم به سیستم HDH را می توان از انرژی خورشیدی

1 Humidification dehumidification (HDH)

نویسنده عهده دار مکاتبات: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

2 Photovoltaic/thermal (PV/T)

تصحیح شده برای بازده اکسرژی سیستم بر حسب اتلافات اکسرژی معرفی کردند و بازده اکسرژی حداکثر سیستم در حدود ۱۴ درصد گزارش کردند [۱۲]. حامد و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی تئوری و تجربی یک سیستم HDH متصل به کلکتور خورشیدی لوله خلاء پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از پیش‌گرمایش آب شور توسط کلکتور خورشیدی قبل از ورود به واحد رطوبت‌زن می‌تواند منجر به افزایش تولید آب شیرین تا حدود ۲۲ lit/day شود و هزینه‌های مصرف انرژی را به ازای تولید ۱ از آب شیرین در حدود \$ ۰/۰۶ کاهش دهد [۱۳]. ویو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به طور آزمایشگاهی عملکرد یک سیستم نمک‌زدایی خورشیدی چند اثره که بر اساس فرایند HDH کار می‌کند را بررسی کرده‌اند [۱۴]. نتایج آزمایشگاهی ایشان نشان می‌دهد که افزایش دبی جرمی آب شور و هوای مرطوب می‌تواند بازده تولید آب شیرین را تا بیش از ۲/۵ برابر افزایش دهد. الاتار و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی و مطالعه اقتصادی یک سیستم تهویه خورشیدی متصل به سیستم نمک‌زدایی HDH پرداختند [۱۵]. آن‌ها نرخ تولید آب شیرین، ظرفیت سرمایه‌گذاری، مصرف توان الکتریکی، شاخص اقتصادی و ضریب عملکرد سیستم ترکیبی را تحت پارامترهای طراحی و عملکردی مختلف بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که در مقایسه با سیستم‌های تهویه معمولی سیستم ترکیبی پیشنهاد شده توسط ایشان دارای ظرفیت سرمایه‌گذاری و ضریب عملکرد بالاتر و همچنین مصرف توان الکتریکی کمتر در نواحی گرم و مرطوب می‌باشد. تحقیقات متعددی [۱۵-۱] در جهت بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های HDH متصل به کلکتورهای خورشیدی معمولی انجام شده است. اما نوآوری تحقیق حاضر اتصال کلکتورهای PV/T به سیستم HDH جهت پیش‌گرمایش آب شور و همچنین تأمین توان الکتریکی لازم برای به جریان انداختن جریان آب و هوا درون سیستم ترکیبی می‌باشد. تحقیق حاضر بر مبنای شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در ابتدا معادلات حاکم بر انتقال حرارت و انتقال جرم در فرایند رطوبت‌زن، رطوبت‌زدا و کلکتور PV/T معرفی خواهند شد. سپس اعتبارسنجی نتایج عددی صورت می‌گیرد و در نهایت به مطالعات پارامتری پرداخته می‌شود و تاثیر پارامترهای مختلف طراحی و عملکردی بر بازده سیستم بررسی می‌شوند.

## ۲- معادلات حاکم بر مسئله

در شکل ۱ یک سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T و اجزای آن نشان داده شده است. نحوه عملکرد سیستم آب‌شیرین‌کن HDH ترکیبی به این صورت می‌باشد که آب شور دریا با دمای پایین وارد واحد رطوبت‌زدا می‌شود و با دریافت گرمای هوای داغ مرطوب خروجی از واحد رطوبت‌زن قدری پیش‌گرم می‌شود. سپس آب شور پیش‌گرم شده وارد مجموعه کلکتورهای PV/T می‌شود و با دریافت انرژی خورشیدی تا حد مناسبی گرم می‌گردد. پس از آن آب شور گرم‌شده وارد واحد رطوبت‌زن می‌گردد و با جریان هوای سرد خارج شده از واحد رطوبت‌زدا تبادل حرارت و انتقال جرم

چند اثره انجام دادند. میزان تولید آب شیرین واحد آن‌ها در حوالی ظهر در حدود ۱/۲۵ lit/m<sup>2</sup>.h بود که به مراتب از حوضچه‌های خورشیدی بیشتر می‌باشد [۵]. خدر در سال ۱۹۹۳ یک روش اقتصادی و مقرون به صرفه برای تقطیر با روش HDH را به کار برد. نتایج وی نشان می‌دهد که ۷۶ درصد انرژی هزینه شده در رطوبت‌زن توسط فرایند چگالش در رطوبت‌زدا بازیابی می‌شود. همچنین از مطالعات اقتصادی وی مشخص شد که روش HDH با تولید آب شیرین در حدود ۱۰ lit/day نسبت به سایر روش‌ها در مقیاس کوچک از صرفه اقتصادی بهتری برخوردار است [۲]. نوایسه و همکاران در سال ۱۹۹۹ بررسی‌های متعددی بر روی سیستم‌های HDH انجام دادند که شامل ارائه معادلات حاکم، معرفی ضرایب انتقال حرارت و جرم در رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا و همچنین شبیه‌سازی عددی عملکرد سیستم HDH متصل به کلکتور خورشیدی معمولی به منظور تخمین آب شیرین خروجی از آن می‌باشد. تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که روش رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا خورشیدی یک روش مؤثر در بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای تولید آب شیرین از آب شور دریا می‌باشد [۷]. موسی و همکاران در سال ۲۰۰۳ اثر استفاده از گازهای مختلف نظیر هوا، هیدروژن، هلیوم، نئون، نیتروژن، اکسیژن، آرگون و دی‌اکسیدکربن را به عنوان سیال عامل بر عملکرد یک سیستم HDH به طور عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که از منظر انتقال حرارت گازهای هیدروژن و هلیوم و از منظر انتقال جرم گازهای آرگون و دی‌اکسیدکربن عملکرد بهتری را نسبت به هوا در اختیار می‌گذارند. در نهایت آن‌ها دی‌اکسیدکربن به عنوان گاز حامل در سیستم HDH پیشنهاد کردند [۸]. تاپواری و سودها در سال ۲۰۰۶ با ارائه یک مدل انتقال حرارت یک بعدی دائم عباراتی تحلیلی برای محاسبه پارامترهای عملکردی کلکتور PV/T شامل دمای سطح کلکتور PV/T، دمای تدارک، دمای آب خروجی و نرخ حرارت مفید جذب شده توسط کلکتور PV/T ارائه کردند [۹]. پراکاش و همکاران در سال ۲۰۱۰ به مرور تکنیکی جامع انواع آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی پرداختند و نشان دادند که نمک‌زدایی خورشیدی بر اساس فرایند رطوبت‌زن-رطوبت‌زدا بهترین روش نمک‌زدایی خورشیدی به علت بازدهی انرژی بالا می‌باشد [۱۰]. هرموسیلو و همکاران در سال ۲۰۱۲ عملکرد یک سیستم HDH را به طور تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. واحد رطوبت‌زن سیستم آن‌ها شامل یک بستر پایه سلولوزی می‌باشد که از طریق آن آب شور جریان یافته و سطح تبخیر قابل ملاحظه‌ای را در اختیار می‌گذارد و واحد رطوبت‌زدا یک مبدل حرارتی مایع-گاز می‌باشد که در آن انرژی حرارتی هدر رفته از چگالش بخار آب موجود در هوای مرطوب جهت پیش‌گرمایش آب شور ورودی بازیابی می‌گردد. انرژی حرارتی لازم برای راه‌اندازی سیستم توسط یک هیتر الکتریکی تأمین می‌شود. آن‌ها به بررسی اثر برخی پارامترهای عملکردی به منظور دستیابی به بازیابی حرارتی بهتر در سیستم پرداختند [۱۱]. یزدان‌پناهی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی آزمایشگاهی بازده اکسرژی یک کلکتور PV/T با سیال عامل آب پرداختند. آن‌ها یک معادله

$$\dot{m}_w C_{p,w} (T_2 - T_1) = \frac{eU_{\text{cond}} A_{\text{cond}} [(T_6 - T_2) - (T_5 - T_1)]}{\ln \left( \frac{T_6 - T_2}{T_5 - T_1} \right)} \quad (2)$$

معادله بالانس انرژی و روابط مبدل‌های حرارتی برای رطوبت‌زن [۱۱]، [۶]، [۷]:

$$\dot{m}_w C_{p,w} (T_3 - T_4) - 0.5U_{\text{loss}} A_{\text{unit}} [0.5(T_5 + T_6) - T_a] = \dot{m}_a (fh_6 - h_5) \quad (3)$$

$$\dot{m}_a (fh_6 - h_5) = \frac{eKaV [(h_3 - fh_6) - (h_4 - h_5)]}{\ln \left( \frac{h_3 - fh_6}{h_4 - h_5} \right)} \quad (4)$$

معادله بالانس انرژی حرارتی برای کل سیستم ترکیبی [۱۱]، [۷]، [۶]:

$$Q_u = U_{\text{loss}} A_{\text{unit}} [0.5(T_5 + T_6) - T_a] + \dot{m}_w C_{p,w} (T_4 - T_1) \quad (5)$$

در معادلات قبل پارامترهای

$$h \text{ و } T_a, Q_u, KaV, U_{\text{loss}}, A_{\text{cond}}, A_{\text{unit}}, C_{p,w}, T, \dot{m}_w, \dot{m}_a$$

به ترتیب دبی جرمی آب شور، دبی جرمی هوا، ظرفیت گرمایی آب شور، سطح جانب سیستم HDH، سطح تبادل انتقال حرارت در رطوبت‌زدا، ضریب اتلاف حرارت کلی از سیستم HDH، حاصل ضرب ضریب انتقال جرم کلی در سطح انتقال جرم برای رطوبت‌زن، نرخ حرارت مفید جذب‌شده توسط کلکتورهای PV/T، دمای محیط، دمای جریان آب شور و هوا در نقاط مختلف سیستم و آنتالپی جریان هوا در نقاط مختلف سیستم می‌باشند. همچنین ضرایب بی‌بعد  $e$  و  $f$  به ترتیب ضریب تصحیح مبدل حرارتی جریان متقاطع و ضریب رطوبت می‌باشند. هوای خروجی از رطوبت‌زن کاملاً اشباع نیست لذا از ضریب  $f$  استفاده می‌شود. رابطه محاسبه  $KaV$  در حالت جریان جابجایی اجباری به صورت زیر می‌باشد [۷]:

$$KaV = \dot{m}_w \left[ 0.53 - 0.22 \log \left( \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \right) \right], \quad 0.1 \leq \dot{m}_w / \dot{m}_a \leq 2 \quad (6)$$

آنتالپی و رطوبت نسبی هوای مرطوب به صورت تابعی از دمای جریان هوا به صورت زیر داده می‌شوند [۷]:

$$h = 0.00585T^3 - 0.497T^2 + 19.87T - 207.61 \quad (7)$$

$$\omega = 2.19 \times 10^{-6} T^3 - 1.85 \times 10^{-4} T^2 + 7.06 \times 10^{-3} T - 0.077 \quad (8)$$

در نهایت مقادیر دبی جرمی آب شیرین تولیدی، دبی جرمی آب شور خروجی و نرخ انتقال حرارت تبخیری توسط روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_a (\omega_6 - \omega_5) \quad (9)$$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_w - \dot{m}_a (\omega_6 - \omega_5) \quad (10)$$

$$q_{\text{evp}} = \dot{m}_a h_{\text{fg}} \quad (11)$$

که در آن  $h_{\text{fg}}$  گرمای نهان تبخیر آب می‌باشد. شایان ذکر است سایر ضرایب انتقال حرارت مربوطه مقادیر ثابتی دارند که مقادیر نمونه آن‌ها در مرجع [۱۱] داده شده است.

انجام می‌دهد. جریان هوا در واحد رطوبت‌زن ضمن افزایش دما، مرطوب نیز می‌گردد. جریان هوای داغ مرطوب دوباره وارد رطوبت‌زدا می‌گردد و بخار آب موجود در آن چگالیده شده و آب شیرین تولیدی جمع‌آوری می‌گردد. در واقع جریان هوای مرطوب نقش حامل بخار آب را از واحد رطوبت‌زن به واحد رطوبت‌زدا ایفا می‌کند و مدام در سیستم HDH سیرکوله می‌گردد. در سیستم مورد مطالعه کلکتورهای PV/T نقش گرمایش آب شور را به عهده دارند و توان الکتریکی لازم برای سیرکوله کردن آب شور و جریان هوای مرطوب را در سیستم HDH تأمین می‌کنند.

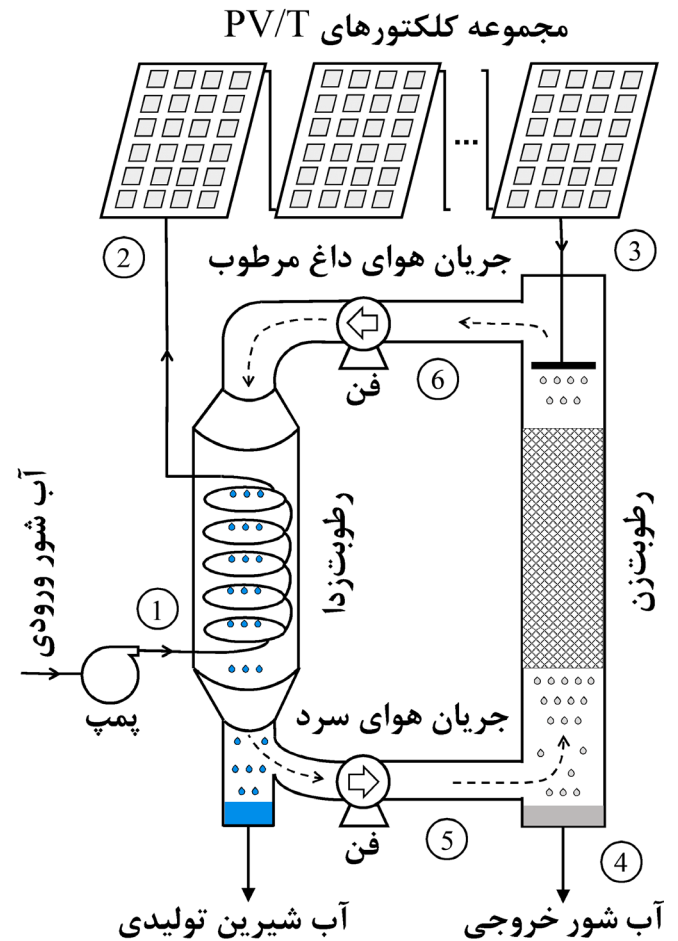


Fig. 1. HDH system connected to PV/T collectors and its components  
شکل ۱: سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T و اجزای آن

فرضیات حاکم بر مسئله شامل جریان حالت دائم، توسعه‌یافته، اختلاف دما در رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به صورت دمای متوسط لگاریتمی، ثابت بودن خواص تابشی سطوح و مقادیر متوسط پارامترهای جوی می‌باشد [۱۲]، [۱۱]، [۶]، [۷]، [۹]. جهت اختصار از بیان اثبات معادلات حاکم خودداری شده است. جزئیات بیشتر به مراجع مربوطه ارجاع داده می‌شود. معادله بالانس انرژی و روابط مبدل‌های حرارتی برای رطوبت‌زدا [۱۱]، [۷]، [۶]:

$$\dot{m}_w C_{p,w} (T_2 - T_1) + 0.5U_{\text{loss}} A_{\text{unit}} [0.5(T_5 + T_6) - T_a] = \dot{m}_a (fh_6 - h_5) \quad (1)$$

بازده انرژی سیستم ترکیبی:

در شکل ۲ حجم کنترل کلی سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T و مولفه‌های مختلف نرخ انرژی در آن نشان داده شده است.

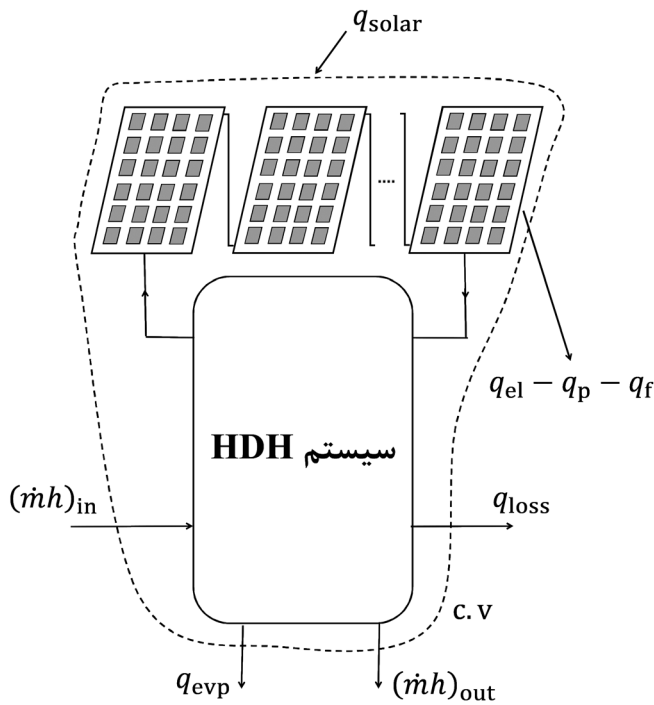


Fig. 2. General control volume of HDH system connected to PV/T collectors and its various energy rate components

شکل ۲: حجم کنترل کلی سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T و مولفه‌های مختلف نرخ انرژی در آن

بالانس انرژی برای حجم کنترل شکل ۲ به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sum_{in} \dot{E}n - \sum_{out} \dot{E}n = \left( \frac{dEn}{dt} \right)_{c.v} \quad (19)$$

در این جا  $\sum_{out} \dot{E}n$ ،  $\sum_{in} \dot{E}n$  و  $(dEn/dt)_{c.v}$  به ترتیب نرخ انرژی‌های ورودی به حجم کنترل، نرخ انرژی‌های خروجی از حجم کنترل و نرخ تغییرات انرژی در حجم کنترل می‌باشند. از جایگذاری مولفه‌های مختلف نرخ انرژی مربوط به شکل ۲ در معادله (۱۹) خواهیم داشت.

$$[q_{solar} - (\dot{m}h)_{in}] - [q_{loss} + q_{evp} + (\dot{m}h)_{out} + (q_{el} - q_p - q_f)/C_f] = \left( \frac{dEn}{dt} \right)_{c.v} \quad (20)$$

بازده انرژی سیستم ترکیبی به صورت نسبت نرخ انرژی مطلوب خروجی از حجم کنترل به نرخ انرژی خالص ورودی به حجم کنترل تعریف می‌شود.

$$\eta_{en} = \frac{q_{desired}}{q_{in,net}} \quad (21)$$

مطابق با شکل ۲ نرخ انرژی مطلوب خروجی شامل نرخ حرارت تبخیری آب شیرین و توان الکتریکی خالص خروجی می‌باشد.

بالانس انرژی برای کلکتور PV/T:

به دلیل اختصار جزئیات بالانس انرژی برای کلکتورهای PV/T ذکر نمی‌شود [۱۲ و ۹]. نرخ حرارت مفید جذب شده توسط N کلکتور PV/T که به صورت سری به هم متصل شده‌اند به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_u = \sum_{i=1}^N q_{u,i} = N F_R A_c [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} G - U_L (T_2 - T_a)] - \frac{F_R A_c U_L}{\dot{m}_w C_{p,w}} \sum_{i=1}^N (N-i) q_{u,i} \quad (12)$$

$$\begin{cases} q_{u,1} = F_R A_c [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} G - U_L (T_2 - T_a)], & N=1 \\ q_{u,N} = F_R A_c [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} G - U_L \left( \frac{1}{\dot{m}_w C_{p,w}} \sum_{i=1}^{N-1} q_{u,i} + T_2 - T_a \right)], & N \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

در این جا پارامترهای  $F_R$ ،  $A_c$ ،  $(\alpha\tau)_{eff}$ ،  $G$ ،  $U_L$ ،  $h_{p1}$  و  $h_{p2}$  به ترتیب ضریب برداشت گرما، مساحت سطح کلکتور PV/T، ضریب جذب-انتقال موثر، شدت تابش خورشیدی، ضریب اتلاف حرارت کلی از کلکتور PV/T و یکسری ضرایب جریمه می‌باشند. توان الکتریکی خروجی از کلکتورهای PV/T توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹].

$$q_{el} = \eta_{el,ref} G N A_c [1 - 0.0045(T_c - T_{a,ref})] \quad (14)$$

که در آن  $\eta_{el,eff}$  و  $T_{a,eff}$  به ترتیب بازده مدول فتوولتائیک در شرایط مرجع و دمای محیط در شرایط مرجع می‌باشند. همچنین دمای سطح کلکتور PV/T می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۱ و ۱۲].

$$T_c = \frac{U_T [h_{p1} (\alpha\tau)_{eff} G + U_{T1} T_a + 0.5 U_w (T_2 + T_3)]}{(U_t + U_T)(U_{T1} + U_w) + \frac{(\alpha\tau)_{eff} G + U_{T1} T_a}{U_t + U_T}} \quad (15)$$

در این جا عبارات  $U$  یکسری ضرایب انتقال حرارت کلی می‌باشند که جزئیات محاسبه آن‌ها در مراجع [۹ و ۱۱] ذکر شده است. توان الکتریکی مصرفی توسط پمپ و فن برای به راه انداختن جریان آب شور و هوای مرطوب در سیستم توسط روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$q_p = \dot{m}_w \Delta P_w / (\rho_w \eta_p) \quad (16)$$

$$q_f = \dot{m}_a \Delta P_a / (\rho_a \eta_f) \quad (17)$$

در روابط فوق پارامترهای  $\Delta P_w$ ،  $\Delta P_a$ ،  $\eta_p$ ،  $\eta_f$ ،  $\rho_w$  و  $\rho_a$  به ترتیب افت فشار جریان آب شور در سیستم، افت فشار جریان هوا در سیستم، بازده پمپ، بازده فن، چگالی آب شور و چگالی هوا می‌باشند. افت فشار جریان آب شور در سیستم شامل افت فشار در رطوبت‌زدا، رطوبت‌زن و کلکتورهای PV/T می‌باشد.

$$\Delta P_w = \Delta P_{w,DH} + \Delta P_{w,HD} + \Delta P_{w,PV/T} \quad (18)$$

PV/T با داده‌های آزمایشگاهی یزدان‌پناهی و همکاران [۱۲] انجام شده است. جهت مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی خطای نسبی متوسط توسط رابطه زیر محاسبه شده است.

$$Er = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{sim,i} - X_{exp,i}}{X_{exp,i}} \right| \times 100 \quad (28)$$

که در آن و مقدار داده شبیه‌سازی یا تجربی و تعداد آزمایشات انجام شده می‌باشد. همچنین اندیس‌های exp و sim به ترتیب بیانگر مقادیر تجربی و شبیه‌سازی می‌باشند.

در شکل ۳ نتایج مقایسه بین دماهای شبیه‌سازی تحقیق حاضر و دماهای تجربی مربوط به تحقیق هرموسیلو و همکاران [۱۱] در نقاط مختلف سیستم نشان داده شده است. مطابق این با شکل روند تغییرات دماهای شبیه‌سازی در نقاط مختلف سیستم مشابه با مقادیر تجربی متناظر می‌باشد. همچنین حداقل و حداکثر خطای نسبی متوسط مربوطه به ترتیب برابر با ۳/۲۲٪ و ۱۰/۴۸٪ می‌باشد که نسبتاً مناسب می‌باشد.

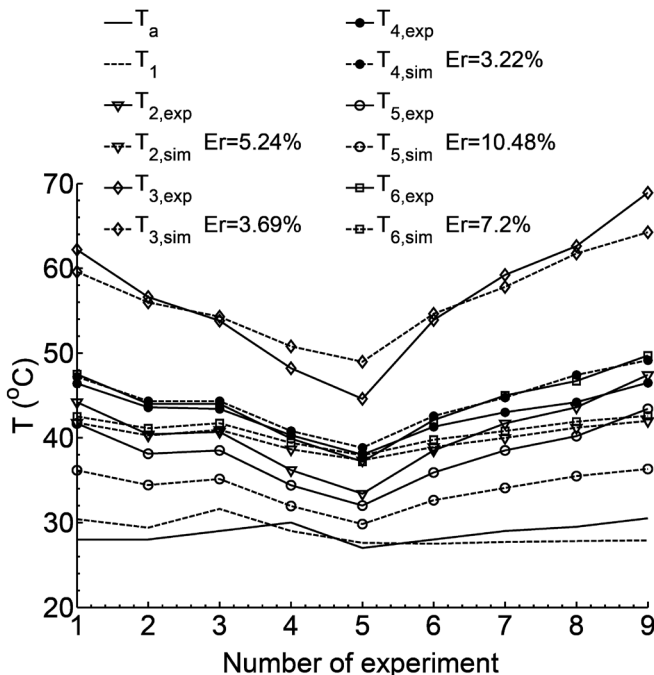


Fig. 3. Comparison results between the simulated temperatures of present study and the experimental temperatures of Hermosillo et al. [11]

شکل ۳: نتایج مقایسه بین دماهای شبیه‌سازی تحقیق حاضر و دماهای تجربی مربوط به تحقیق هرموسیلو و همکاران [۱۱]

در شکل ۴ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی نرخ تولید آب شیرین انجام شده است. خطای نسبی متوسط مربوطه در حدود ۱۴٪ می‌باشد. در شکل ۵ نتایج عددی مربوط به نرخ تولید آب شیرین با داده‌های تجربی اسلامی‌منش و حاتمی‌پور [۱۶] نسبت به تغییرات دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا اعتبارسنجی شده است. مطابق با این شکل خطای متوسط نرخ تولید آب شیرین نسبت به داده‌های آزمایشگاهی متناظر در حدود ۶٪ می‌باشد.

$$q_{desired} = q_{exp} + (q_{el} - q_p - q_f) / C_f \quad (22)$$

کیفیت انرژی الکتریکی و حرارتی یکسان نیست. در این جا  $C_f$  یک ضریب تبدیل برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی معادل آن می‌باشد. همچنین در حجم کنترل شکل ۲ نرخ انرژی خالص ورودی شامل انرژی تابش خورشیدی می‌باشد.

$$q_{in,net} = q_{solar} = GNA_c \quad (23)$$

اگر معادله (۲۰) بر حسب نرخ انرژی مطلوب خروجی از حجم کنترل مرتب‌سازی شود و دو طرف آن بر نرخ انرژی خالص ورودی تقسیم شود و جملات متناظر از معادلات (۹)، (۱۱)، (۱۴)، (۱۶)، (۱۷) و (۲۳) در آن جایگذاری شود در نهایت بازده انرژی سیستم ترکیبی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m}_a (\omega_6 - \omega_5) h_{fg} + \eta_{el,ref} [1 - 0.0045(T_c - T_{a,ref})]}{GNA_c C_f} - \frac{\frac{\dot{m}_w \Delta P_w}{\rho_w \eta_p} + \frac{\dot{m}_a \Delta P_a}{\rho_a \eta_f}}{GNA_c C_f} \quad (24)$$

در اغلب موارد بسیار مناسب خواهد بود که بازده انرژی اجزاء مختلف سیستم ترکیبی بررسی و مطالعه شود. چون این موضوع می‌تواند درک عمیق‌تری راجع به نرخ انرژی‌های هزینه‌ساز و نقش آن‌ها بر عملکرد سیستم را در اختیار گذارد. بازده مجموعه کلکتورهای PV/T، رطوبت‌زن و رطوبت‌زدا به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{PV/T} = \frac{Q_u}{GNA_c} \quad (25)$$

$$\eta_{hum} = \frac{\dot{m}_a (h_6 - h_5)}{\dot{m}_w (h_3 - h_4)} \quad (26)$$

$$\eta_{deh} = \frac{\dot{m}_w (h_2 - h_1)}{\dot{m}_a (h_6 - h_5)} \quad (27)$$

### ۳- اعتبارسنجی

معادلات حاکم بر مسئله یک دستگاه از معادلات جبری را تشکیل می‌دهند. دستگاه مذکور توسط روش‌های عددی در نرم‌افزار متلب حل شده است. جهت اطمینان از صحت حل عددی، اعتبارسنجی نتایج عددی تحقیق حاضر با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته صورت گرفته است. با توجه به این که در تحقیقات گذشته سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T بررسی نشده است و داده‌ی آزمایشگاهی و عددی برای چنین سیستم ترکیبی موجود نیست لذا فرایند اعتبارسنجی در دو بخش مجزا به شرح اعتبارسنجی نتایج عددی مربوط سیستم HDH با داده‌های تجربی هرموسیلو و همکاران [۱۱] و اسلامی‌منش و حاتمی‌پور [۱۶] و اعتبارسنجی نتایج عددی مربوط کلکتور

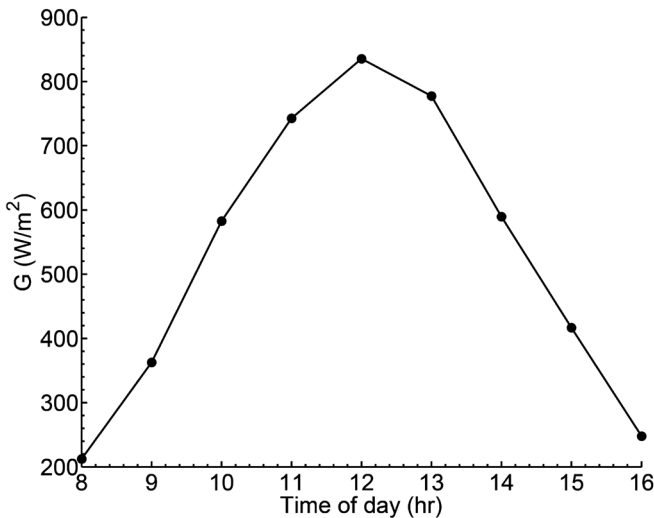


Fig. 6. Solar intensity data of Yazdanpanahi et al. [12] versus the time of day

شکل ۶: داده‌های شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان روز مربوط به تحقیق یزدان‌پناهی و همکاران [۱۲]

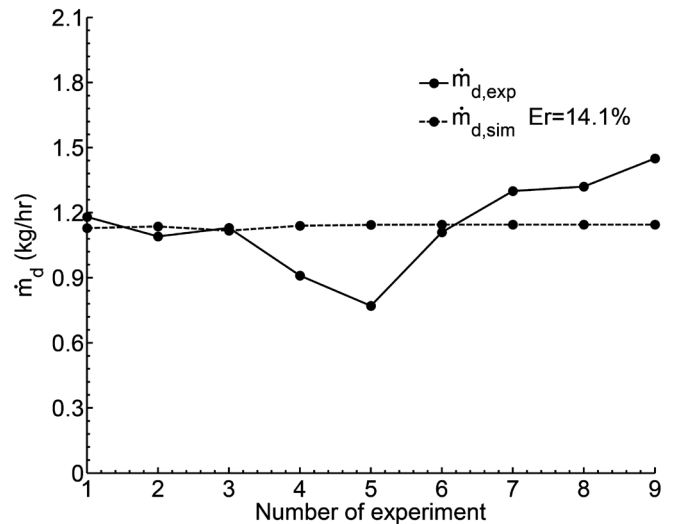


Fig. 4. Comparison between the simulated and experimental values of freshwater productivity

شکل ۴: مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی نرخ تولید آب شیرین

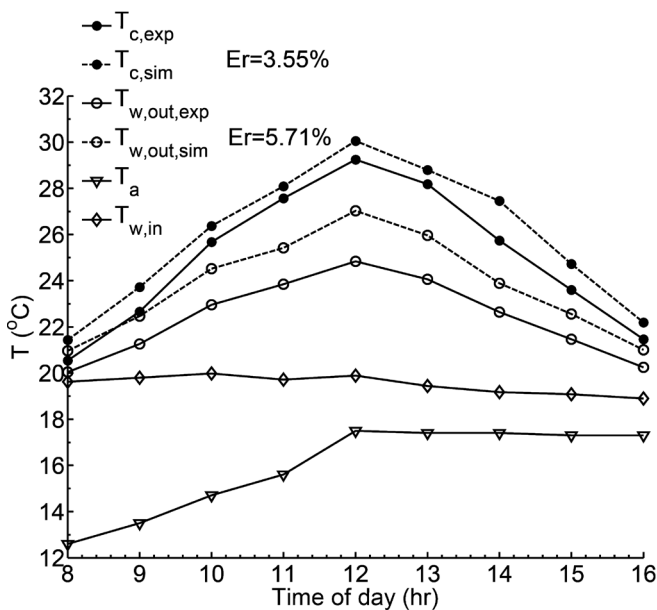


Fig. 7. Comparison between the simulated and experimental values of the various temperatures of PV/T collector

شکل ۷: مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دماهای مختلف کلکتور PV/T

با توجه به شکل‌های ۳ تا ۸ می‌توان اظهار داشت که روند تغییرات پارامترهای شبیه‌سازی تحقیق حاضر مشابه مقادیر تجربی متناظر می‌باشد. از سوی دیگر مقادیر خطای نسبی به دست آمده در تحقیق حاضر در محدوده خطاهای گزارش شده در مراجع گذشته می‌باشد. به عنوان نمونه خطای نسبی مربوط به مقادیر شبیه‌سازی نرخ تولید آب شیرین در تحقیق هرموسیلو و همکاران [۱۱] نسبت به داده‌ی آزمایشگاهی مربوطه در حدود ۱۲٪ می‌باشد. لذا نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر در توافق نسبتاً مناسبی با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته می‌باشد.

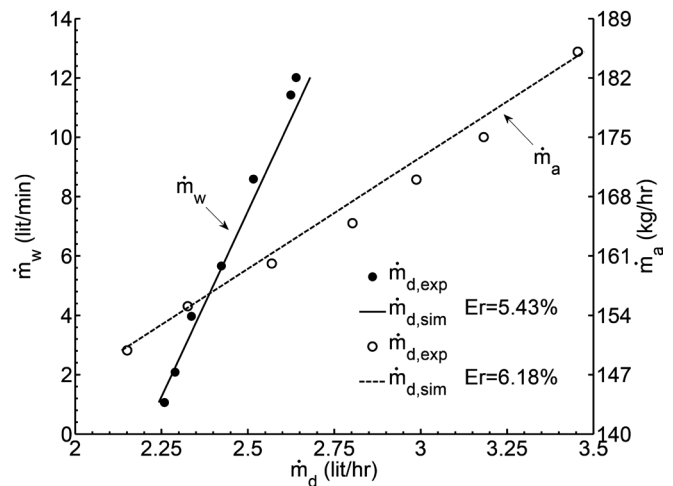


Fig. 5. Validation of numerical results of freshwater productivity with the data of Eslamimanesh and Hatamipour [16] with respect to the variation of brackish water mass flow rate and air mass flow rate

شکل ۵: اعتبارسنجی نتایج عددی مربوط به نرخ تولید آب شیرین با داده‌های تجربی اسلامی‌منش و حاتمی‌پور [۱۶] نسبت به تغییرات دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا

در شکل ۶ داده‌های شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان روز مربوط به تحقیق یزدان‌پناهی و همکاران [۱۲] داده شده است. مطابق شکل ۶ حداکثر شدت تابش خورشیدی در حوالی ظهر رخ داده است.

در شکل ۷ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی دمای سطح کلکتور PV/T و دمای آب خروجی با مقادیر آزمایشگاهی دماهای متناظر مربوط به تحقیق یزدان‌پناهی و همکاران [۱۲] انجام شده است. خطای نسبی دو دمای مذکور به ترتیب ۳/۵۵٪ و ۵/۷۱٪ می‌باشد.

در شکل ۸ مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی توان الکتریکی خروجی از کلکتور PV/T با هم مقایسه شده است. مقدار خطای نسبی متوسط مربوطه در حدود ۸٪ می‌باشد.

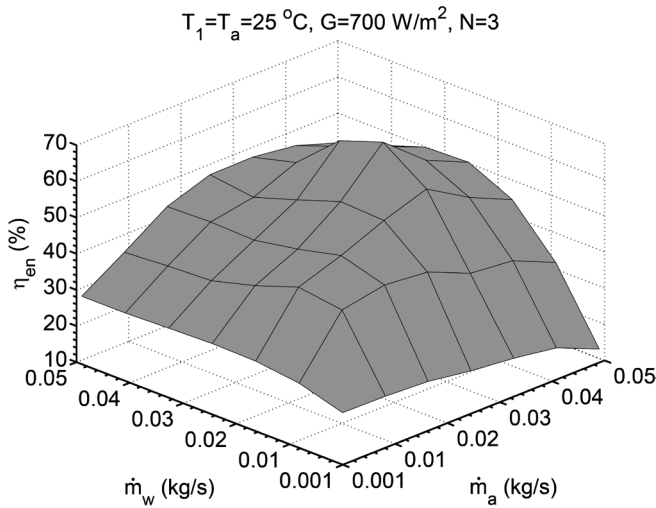


Fig. 9. Variation of energy efficiency of HDH system connected to PV/T collectors versus the variation of brackish water mass flow rate and air mass flow rate

شکل ۹: تغییرات بازده انرژی سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T بر حسب تغییرات دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا

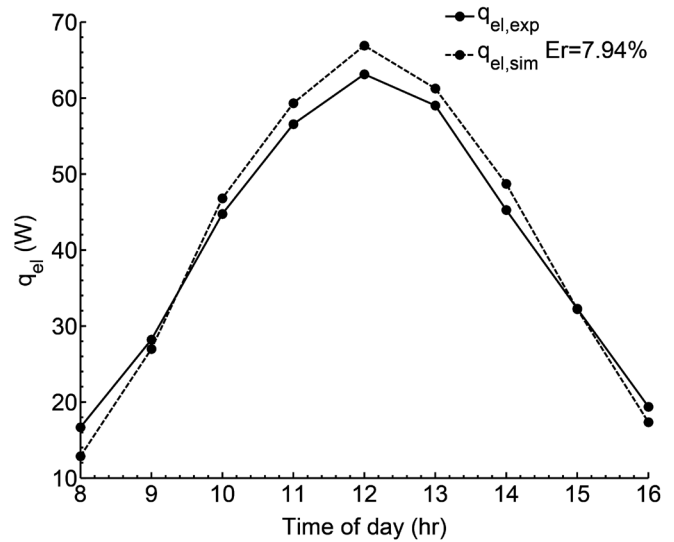


Fig. 8. Simulated and experimental values of output electrical power from PV/T collector

شکل ۸: مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی توان الکتریکی خروجی از کلکتور PV/T

#### ۴- بررسی نتایج

در مطالعات پارامتری این بخش از داده‌های جوی متوسط به شرح شدت تابش خورشیدی برابر با  $700 \text{ W/m}^2$  و دمای محیط برابر با  $25^\circ\text{C}$  استفاده می‌گردد. در شکل ۹ بازده انرژی سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T بر حسب تغییرات دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا در سیستم به صورت سه بعدی ترسیم شده است. شرایط جوی و عملکردی استفاده شده در ترسیم نمودار در بالای شکل مربوطه معرفی شده است. شایان ذکر است برای محاسبه بازده انرژی سیستم ترکیبی از کلکتور PV/T مربوط به تحقیق یزدان‌پناهی و همکاران [۱۲] استفاده شده است. مساحت سطح کلکتور PV/T تحقیق مذکور  $0.76 \text{ m}^2$  می‌باشد. برای تامین انرژی حرارتی لازم جهت راه‌اندازی سیستم حداقل به تعداد ۳ کلکتور PV/T با مساحت سطح کل برابر با  $2/3 \text{ m}^2$  نیاز می‌باشد. مساحت سطح مذکور شامل سطح سلول‌های فتوولتائیک و سطح جاذب حرارتی کلکتور خورشیدی می‌باشد.

مطابق با شکل ۹ مقدار مطلوبی برای دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا در سیستم ترکیبی وجود دارد که به ازای آن بازده انرژی سیستم حداکثر می‌باشد. مقدار دبی جرمی مطلوب آب شور و هوا به ترتیب برابر با  $0.025 \text{ kg/s}$  و  $0.03 \text{ kg/s}$  می‌باشد که به ازای آن بازده انرژی حداکثر در حدود  $65\%$  است. با افزایش دبی جرمی آب شور و هوا پس از مقادیر مطلوب آن‌ها، افت فشار آب شور و هوا در سیستم و در نتیجه آن توان الکتریکی مصرفی پمپ و فن به طور قابل ملاحظه‌ای بالا می‌رود و باعث کاهش بازده انرژی می‌گردد. این کاهش بازده می‌تواند در حدود  $30\%$  درصد باشد. مقدار تولید آب شیرین در دبی جرمی مطلوب آب شور و هوا ذکر شده و مساحت سطح کل کلکتور PV/T مذکور در حدود  $0.9 \text{ kg/hr}$  می‌باشد.

در شکل ۱۰ تغییرات بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی بر حسب تغییرات تعداد کلکتورهای PV/T ترسیم شده است.

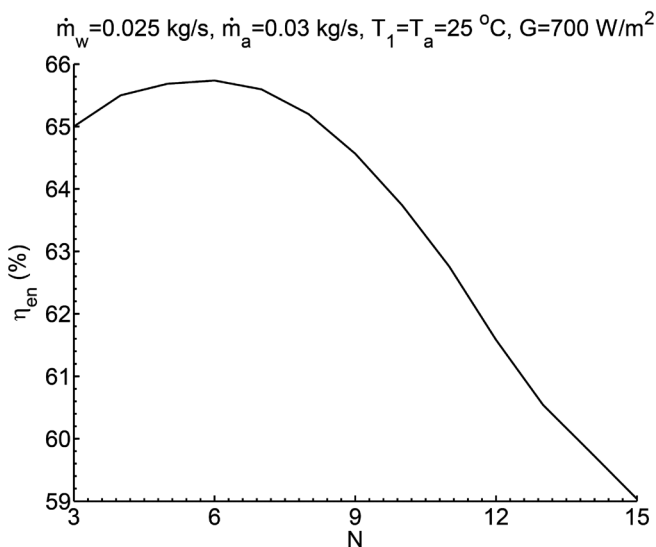


Fig. 10. Variation of energy efficiency of hybrid HDH system versus PV/T collectors number

شکل ۱۰: تغییرات بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی بر حسب تغییرات تعداد کلکتورهای PV/T

مطابق با شکل ۱۰ از تعداد کلکتور ۶ به بعد، با افزایش تعداد کلکتورها به دلیل افزایش افت فشار و به طبع افزایش توان الکتریکی مصرفی پمپ، بازده انرژی از مقدار  $65/6$  به  $59$  درصد کاهش می‌یابد. همچنین در بازه تعداد کلکتورها ۳ تا ۶، بازده انرژی کمتر از  $1\%$  افزایش می‌یابد که با توجه به تفاوت قیمت مدول‌های فتوولتائیک مابین تعداد ۳ و ۶، قاعدتاً تعداد کلکتور ۳ انتخاب می‌شود. در شکل ۱۱ تاثیر دمای آب شور ورودی بر بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی بررسی شده است.

با توجه به شکل ۱۱، افزایش  $60\%$  درصد دمای آب شور ورودی باعث کاهش  $9\%$  درصدی بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی می‌شود. با افزایش

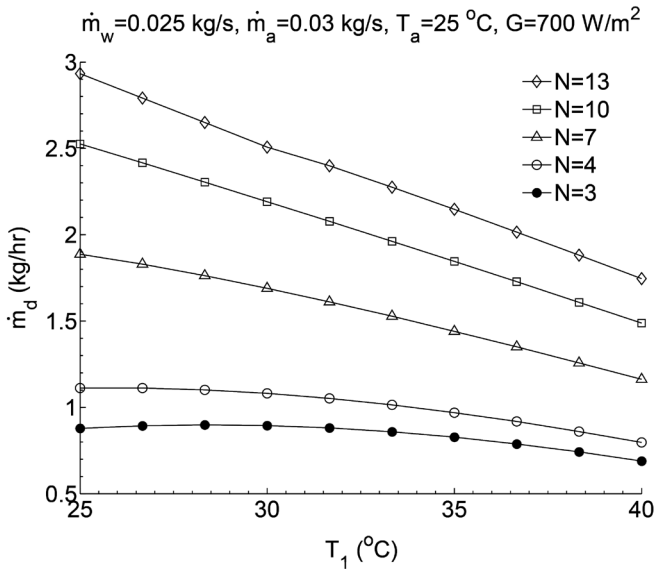


Fig. 12. Hourly rate of freshwater productivity versus inlet brackish water temperature in various PV/T collectors number

شکل ۱۲: نرخ ساعتی تولید آب شیرین بر حسب دمای آب شور ورودی در تعداد مختلف کلکتورهای PV/T

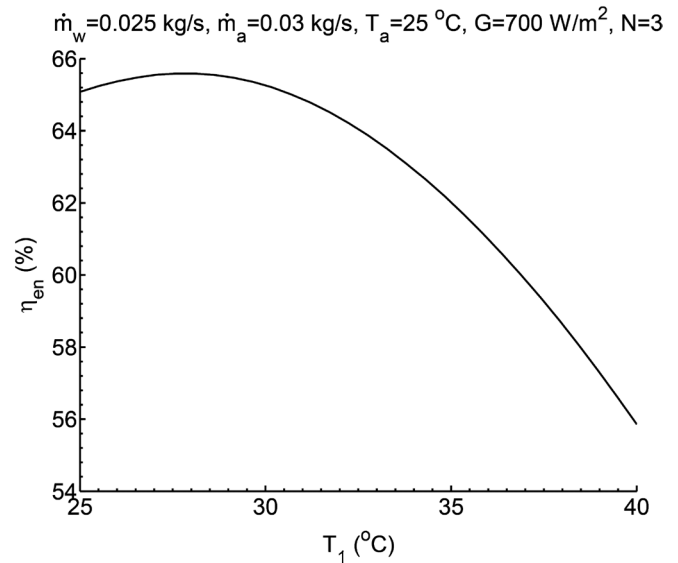


Fig. 11. Effect of inlet brackish water temperature on the energy efficiency of hybrid HDH system

شکل ۱۱: تاثیر دمای آب شور ورودی بر بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی

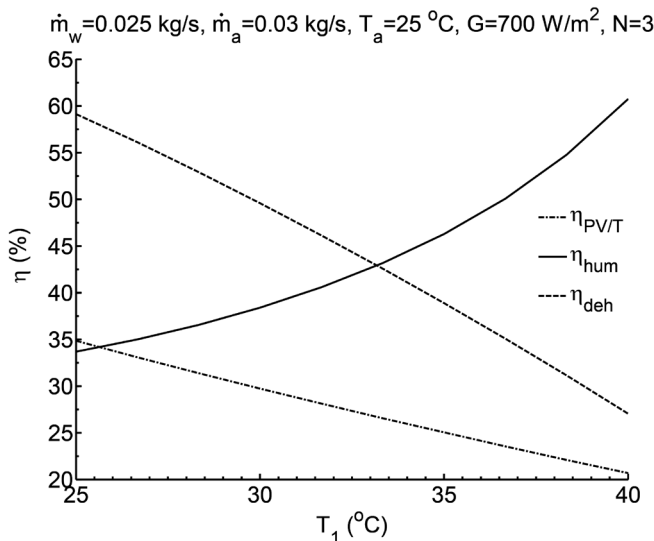


Fig. 13. Energy efficiency of PV/T collectors, humidifier and dehumidifier versus inlet brackish water temperature

شکل ۱۳: بازده انرژی مجموعه کلکتورهای PV/T، رطوبت زن و رطوبت زدا بر حسب دمای آب شور ورودی

مطابق با شکل ۱۳ با افزایش دمای آب شور ورودی عملکرد رطوبت زن بهبود می یابد و بازده آن افزایش می یابد. ولی چون دمای جریان آب شور (سیال مبرد) در رطوبت زدا (چگالنده) بالا می رود بخار آب کمتری از هوای مرطوب چگالیده می شود و بازده آن کاهش می یابد. همچنین چون آب شور با دمای بالاتری وارد مجموعه کلکتورهای PV/T لذا خنک کاری آن ها کمتر صورت می گیرد و بازده آن کاهش می یابد. در مجموع، با افزایش ۶۰ درصدی در دمای آب شور ورودی، یک کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی به ترتیب در بازده کلکتورهای PV/T و بازده رطوبت زدا و همچنین یک افزایش ۳۰ درصدی

دمای آب شور ورودی به دلیل بالا رفتن دمای جریان آب در رطوبت زدا (چگالنده)، از میزان چگالش بخار آب از هوای مرطوب کاسته می شود و همچنین دمای آب ورودی به کلکتورهای PV/T نیز بالا می رود که باعث کاهش عملکرد آن ها می شود که پیامد آن کاهش بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی است. هر چند افزایش دمای آب شور ورودی می تواند تاثیر مثبتی بر عملکرد جزء رطوبت زن داشته باشد ولی به خاطر تاثیر منفی آن بر رطوبت زدا و کلکتورهای PV/T، باعث کاهش بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی می شود. تاثیر مثبت افزایش دمای آب شور ورودی را می توان در محدوده ۲۵ تا ۲۷ درجه سانتی گراد مشاهده کرد هر چند که افزایش بازده انرژی چندان چشمگیر نیست.

در شکل ۱۲ به بررسی تاثیر پارامترهای دمای آب شور ورودی و تعداد کلکتور PV/T بر نرخ تولید آب شیرین پرداخته شده است. با افزایش دمای آب شور ورودی از نرخ تولید آب شیرین به دلیل کاهش عملکرد رطوبت زن کاسته می شود. درصد این کاهش، در بازه تعداد کلکتورهای PV/T بین ۳ تا ۱۳ عدد در حدود ۲۲ تا ۴۵ درصد می باشد. ولی با افزایش تعداد کلکتورهای PV/T به نرخ تولید آب شیرین افزوده می شود. به طور مثال افزایش تعداد کلکتورهای PV/T از ۳ به ۴ عدد به طور متوسط نرخ تولید آب شیرین را در حدود ۲۰ درصد بالا می برد.

شایان ذکر است در این جا افزایش نرخ تولید آب شیرین به منزله افزایش بازده انرژی سیستم ترکیبی نیست چون افزایش تعداد کلکتورهای PV/T افت فشار آب شور و توان مصرفی پمپاژ را نیز افزایش می دهد که منجر به کاهش بازده انرژی می گردد.

در شکل ۱۳ بازده انرژی مجموعه کلکتورهای PV/T، رطوبت زن و رطوبت زدا بر حسب دمای آب شور ورودی نشان داده شده است.



- نتایج شبیه‌سازی انجام شده برای سیستم HDH و کلکتور PV/T در توافق نسبتاً مناسبی با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته می‌باشد به نحوی که خطای نسبی حداکثر برای نرخ تولید آب شیرین و دماهای عملکردی سیستم به ترتیب در حدود ۱۴ و ۱۰ درصد می‌باشد.
- مقدار مطلوبی برای دبی جرمی آب شور و دبی جرمی هوا در سیستم ترکیبی وجود دارد که به ازای آن بازده انرژی سیستم حداکثر می‌باشد. مقادیر مطلوب دبی جرمی آب شور و هوا و بازده حداکثر سیستم به ترتیب برابر  $0.25 \text{ kg/s}$ ،  $0.3 \text{ kg/s}$  و  $65\%$  به دست آمدند.
- نسبت مقدار مطلوب دبی جرمی آب شور به دبی جرمی هوا برابر با  $0.83$  بوده که به ازای آن دبی جرمی آب شیرین تولیدی در حدود  $0.9 \text{ hr}$  می‌باشد.
- سیستم ترکیبی علاوه بر تامین توان الکتریکی مصرفی توسط پمپ و فن، می‌تواند توان الکتریکی اضافه جهت سایر مصارف در اختیار گذارد. به نحوی در شرایط مختلف عملکردی، توان الکتریکی خالص خروجی از سیستم به طور متوسط در حدود ۱۸ تا ۳۰ درصد از کل توان تولیدی سیستم را شامل می‌شود.
- افزایش تعداد کلکتورهای PV/T از ۳ به ۴ عدد به طور متوسط نرخ تولید آب شیرین را در حدود ۲۰ درصد بالا می‌برد.
- در بازه تعداد کلکتورها ۳ تا ۶ تغییرات بازده انرژی کمتر از ۱٪ می‌باشد لذا با توجه به افزایش قیمت مدول‌های فتوولتائیک، قاعدتاً تعداد ۳ کلکتور برای سیستم HDH انتخاب می‌شود.
- افزایش دمای آب شور ورودی به خاطر تاثیر منفی آن بر عملکرد رطوبت‌زدا و کلکتورهای PV/T، باعث کاهش ۲۲ درصدی نرخ تولید آب شیرین و کاهش ۹ درصدی بازده انرژی سیستم HDH ترکیبی می‌شود.

#### منابع

- [1] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion and Management*, 49 (2008) 2602-2608.
- [2] M. Khedr, Techno-economic investigation of an air humidification-dehumidification desalination process, *Chemical Engineering Technique*, 16 (1993) 270-274.
- [3] M. Wolf, Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences, *Energy Conversion and Management*, 16 (1976) 79-90.
- [4] L.W. Florschuetz, Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors, *Solar Energy*, 22 (1979) 361-366.
- [5] A.A. Madani, G.M. Zaki, Prospective of two small water producing units, *Desalination*, 73 (1989) 167-180.
- [6] N.K. Nawayseh, M.M. Farid, S. Al-Hallaj, A.R. Al-

در بازده رطوبت‌زن مشاهده می‌گردد.

در شکل ۱۴ نسبت توان الکتریکی خالص خروجی از سیستم HDH ترکیبی بر کل توان تولیدی آن بر حسب دمای آب شور ورودی در تعداد مختلف کلکتورهای PV/T ترسیم شده است.

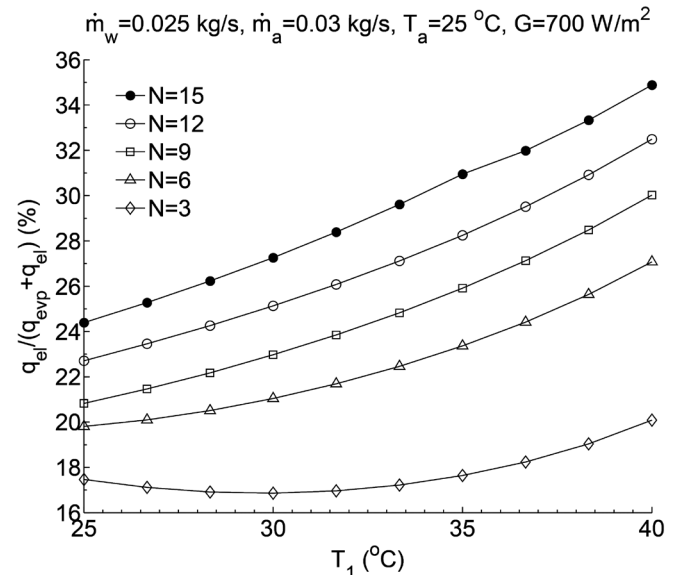


Fig. 14. Ratio of net output electrical power of hybrid HDH system on its total produced power with respect to inlet brackish water temperature in various PV/T collectors number

شکل ۱۴: نسبت توان الکتریکی خالص خروجی از سیستم HDH ترکیبی بر کل توان تولیدی آن بر حسب دمای آب شور ورودی در تعداد مختلف کلکتورهای PV/T

مطابق با شکل ۱۴، نسبت توان الکتریکی خالص خروجی به کل توان تولیدی سیستم HDH با افزایش دمای آب شور ورودی و تعداد کلکتورهای PV/T افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این موضوع آن است که با افزایش دمای آب شور ضرایب انتقال حرارت مربوطه در کلکتور PV/T تغییر محسوسی نمی‌یابند لذا توان الکتریکی خروجی با تغییرات دمای آب شور تقریباً ثابت می‌ماند. ولی نرخ تولید آب شیرین با افزایش دمای آب شور ورودی با عنایت به موارد گفته شده در شکل ۱۲ کاهش می‌یابد. واضح است که با کاهش نرخ تولید آب شیرین یا نرخ انتقال حرارت تبخیری، مخرج کسر درصد توان الکتریکی کاهش می‌یابد و یا به عبارت دیگر درصد توان الکتریکی افزایش می‌یابد. در مجموع، توان الکتریکی خالص خروجی با توجه به شرایط مختلف عملکردی سیستم می‌تواند به طور متوسط در حدود ۱۸ تا ۳۰ درصد از کل توان تولیدی سیستم را شامل شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر شبیه‌سازی عددی یک سیستم HDH متصل به کلکتورهای PV/T به منظور بررسی عملکرد آن انجام شد. تاثیر پارامترهای مختلف عملکردی و طراحی بر بازده انرژی سیستم ترکیبی و نرخ تولید آب شیرین بررسی شد. نتایج عمده تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشد:

- model and experimental study, *Solar Energy*, 86 (2012) 1070-1076.
- [12] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, M. Mahdavi Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses, *Solar Energy*, 118 (2015) 197-208.
- [13] M.H. Hamed, A.E. Kabeel, Z.M. Omara, S.W. Sharshir, Mathematical and experimental investigation of a solar humidification–dehumidification desalination unit, *Desalination*, 358 (2015) 9-17.
- [14] G. Wu, H. Zheng, H. Kang, Y. Yang, P. Cheng, Z. Chang, Experimental investigation of a multi-effect isothermal heat with tandem solar desalination system based on humidification–dehumidification processes, *Desalination*, 378 (2016) 100-107.
- [15] H.F. Elattar, A. Fouda, S.A. Nada, Performance investigation of a novel solar hybrid air conditioning and humidification–dehumidification water desalination system, *Desalination*, 382 (2016) 28-42.
- [16] A. Eslamimanesh, M.S. Hatamipour, Mathematical modeling of a direct contact humidification–dehumidification desalination process, *Desalination*, 237 (2009) 296-304.
- Timimi, Solar desalination based on humidification process: I–evaluating the heat and mass transfer coefficients, *Energy Conversion and Management*, 40(13) (1999) 1423-1439.
- [7] N.K. Nawayseh, M.M. Farid, A.A. Omar, A. Sabirin, Solar desalination based on humidification process: II–computer simulation, *Energy Conversion and Management*, 40(13) (1999) 1441-1461.
- [8] K. Mousa, A. Arabi, K.V. Reddy, Performance evaluation of desalination processes based on the humidification dehumidification cycle with different carrier gases, *Desalination*, 156 (2003) 281-293.
- [9] A. Tiwari, M.S. Sodha, Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation, *Solar Energy*, 80 (2006) 751-759.
- [10] G. Prakash Narayan, H. Mostafa, E.K. Sharqawy, J.H. Summers, S.Z.M. Lienhard, M.A. Antar, The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010) 1187-1201.
- [11] J.J. Hermsillo, C.A. Arancibia-Bulnes, C.A. Estrada, Water desalination by air humidification: Mathematical

Please cite this article using:

M. A. Hosseini and F. Sarhaddi, "Performance Assessment of a Humidification-Dehumidification Desalination Unit Connected to Photovoltaic Thermal Collectors" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 653-662.  
DOI: 10.22060/mej.2016.765

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

