



## تحلیل ترمو اقتصادی آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

عرفان هدایتی مهدی‌آبادی، فرامرز سرحدی\*، فاطمه صبح‌نمایان

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۲  
بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۲۴  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

### کلمات کلیدی:

آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای  
دوشبیه  
تحلیل انرژی  
تحلیل اقتصادی  
گردآورنده فتوولتائیک حرارتی  
ماده تغییر فاز

**خلاصه:** در تحقیق حاضر به تحلیل ترمو اقتصادی آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداخته شده است. معادلات حاکم بر مسئله توسط نوشتن موازنه انرژی برای اجزاء مختلف سیستم به دست آمده است. هدف از حل معادلات حاکم محاسبه دمای پوشش شیشه‌ای، دمای صفحه جاذب، دمای آب شور، دمای ماده تغییر فاز، میزان تولید آب شیرین و نرخ حرارت جذب شده توسط گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد. همچنین توان الکتریکی خروجی مدول فتوولتائیک توسط مدل چهار پارامتری جریان-ولتاژ محاسبه شده است. نتایج عددی تحقیق حاضر در توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. بررسی عملکرد سیستم از منظر تولید آب شیرین و راندمان انرژی برای روز زمستانی و روز تابستانی شهر زاهدان انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی جرمی از  $0.001 \text{ kg/s}$  به  $0.01 \text{ kg/s}$  میزان تولید آب شیرین  $10.6\%$  افزایش می‌یابد. افزایش جرم آب شور درون حوضچه از  $20 \text{ kg}$  به  $30 \text{ kg}$  در روز، میزان تولید آب شیرین را در حدود  $4.8\%$  کاهش می‌دهد ولی در شب، در حدود  $7.43\%$  افزایش می‌دهد. راندمان انرژی در روز زمستانی نسبت به روز تابستانی به میزان  $37.5\%$  کمتر است. از تحلیل اقتصادی سیستم هزینه تولید آب شیرین به ازای واحد سطح برابر با  $0.314$  دلار برای هر لیتر به دست آمد.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر کمبود آب شیرین به یکی از چالش‌های اصلی برای ادامه حیات بشری تبدیل شده است. منابع آب‌های آشامیدنی در حدود ۳ درصد از آب‌های کل روی زمین را تشکیل می‌دهند و استفاده از آب اقیانوس‌ها به دلیل داشتن حدود  $3/5$  درصد املاح مختلف به طور مستقیم قابل استفاده نیستند [۱]. آب آشامیدنی نباید بیش از  $1000$  میلی‌گرم در لیتر املاح داشته باشد، در صنعت هم آب‌های سخت با املاح زیاد علاوه بر امکان خوردگی، با ایجاد رسوب در لوله‌ها و دستگاه‌ها مشکلاتی در تأسیسات ایجاد و سرمایه‌های هنگفتی را به هدر می‌دهد. به همین دلیل جامعه بشری برای رهایی از این مشکل نیازمند راه‌هایی برای تأمین آب آشامیدنی و شرب است. با توجه به هزینه بالا و مشکلات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی خورشیدی در کشورهایی همچون ایران جهت تقطیر خورشیدی آب شور دریاها و یا منابع آب‌های زیرزمینی نامطلوب می‌تواند راه مناسبی برای تولید آب شیرین باشد.

### ۱-۱- آب شیرین کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

رایج‌ترین نوع سیستم‌های نمک‌زدایی خورشیدی در مقیاس خانگی، آب شیرین کن‌های خورشیدی حوضچه‌ای<sup>۱</sup> هستند. در این میان آب شیرین کن‌های خورشیدی دوشبیه<sup>۲</sup> به دلیل داشتن دو شیشه چگالنده، امکان استفاده از تابش خورشیدی را در اغلب ساعات روز فراهم می‌آورند. بازده تولید آب شیرین حوضچه‌های خورشیدی چندان بالا نیست. از این رو می‌توان با اتصال این آب شیرین کن‌ها به گردآورنده‌های خورشیدی، راندمان آن‌ها را قدری افزایش داد. گردآورنده خورشیدی نقش پیش‌گرم کن آب شور را ایفا کرده و با ازدیاد دمای آب شور درون حوضچه راندمان سیستم را افزایش می‌دهد. اگر گردآورنده خورشیدی از نوع فتوولتائیک حرارتی<sup>۳</sup> انتخاب شود، می‌تواند توان الکتریکی لازم برای پمپاژ آب شور را در حالت جابجایی اجباری در سیستم آب شیرین کن فراهم آورد. شب هنگام به دلیل عدم وجود

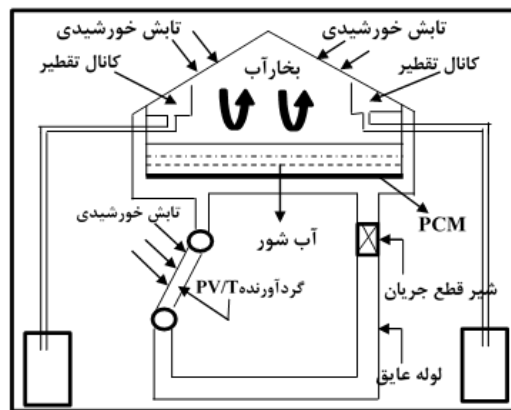
- 1 Basin solar stills
- 2 Double slope solar still
- 3 PhotoVoltaic/Thermal collector (PV/T)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir



۱-۲- مروری بر پژوهش‌های گذشته

لاوازیه در سال ۱۸۶۲ از دو عدسی بزرگ شیشه‌ای جهت متمرکز کردن نور خورشید روی ظروف حاوی آب املاح دار استفاده کرد و با این روش آب مقطر تولید نمود [۲]. اولین شخصی که دستگاه تقطیر خورشیدی را طراحی نمود، ویلسون در سال ۱۸۷۲ بود [۲]. او هر روز آب املاح‌دار را در مخزن دستگاه می‌ریخت و این آب در اثر تابش خورشید تبخیر می‌گردید و در نتیجه روی جداره داخلی پوشش شیشه‌ای چگالش می‌یافت و به این روش آب مقطر تهیه می‌گردید. در سال ۲۰۰۹ السبایی و همکاران [۳] به بررسی عملکرد حرارتی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک حوضچه‌ای مجهز به مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان منبع ذخیره‌سازی انرژی پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پس از غروب آفتاب تا صبح روز بعد، مواد تغییر فاز دهنده به‌عنوان منبع حرارتی برای آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای عمل خواهد کرد. همچنین قابلیت تولید دستگاه آب‌شیرین‌کن آن‌ها در یک روز تابستانی به مقدار  $9/005 \text{ day.kg/m}^2$  با یک بازدهی ۸۴ درصد بود. در سال ۲۰۱۰ دیودی و تیواری [۴] به مدل‌سازی حرارتی دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه فعال تحت گردش طبیعی آب پرداختند و نشان دادند که عملکرد روزانه آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه غیرفعال در حدود  $1/84 \text{ kg/m}^2$  می‌باشد؛ در حالی که عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه فعال تحت شرایط یکسان در حدود  $2/8 \text{ kg/m}^2$  است. در سال ۲۰۱۶ آسبیک و همکاران [۵] به تجزیه و تحلیل انرژی دستگاه تقطیر خورشیدی مجهز به منبع ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار انرژی تلف‌شده در طی دوره تابش خورشید به خصوص از صفحه جذب قابل ملاحظه است. لذا با اتصال منبع ذخیره حرارتی مواد تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جذب می‌توان انرژی حرارتی تلف‌شده را ذخیره نمود و شب هنگام برای تولید آب شیرین استفاده کرد. رهبر و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷ به مطالعه تجربی راندمان اکسرژی و تحلیل اقتصادی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه مجهز به ماژول گرمایی ترموالکتریک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که راندمان اکسرژی در طول زمان آزمایش افزایش می‌یابد و ماکزیمم راندمان اکسرژی سیستم در حدود ۲۵ درصد بوده و در ساعت ۳ بعدازظهر اتفاق می‌افتد و معمولاً تغییرات راندمان اکسرژی و دمای محیط، یک‌روند متضادی دارا می‌باشند. همچنین از منظر اقتصادی به این نتیجه رسیدند که هزینه تولید آب برای روز و شب به ترتیب  $0/1422$  و  $0/237$  دلار برای هر لیتر می‌باشد که نشان می‌دهد هزینه تولید آب در شب در حدود ۱۶۰٪ بیشتر از روزها می‌باشد. در سال ۲۰۱۷ یزدان پناهی و سرحدی [۷] به بررسی تجربی



شکل ۱: آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به مواد تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Fig. 1. Basin type double slope solar still equipped with phase change material and photovoltaic thermal collector

تابش خورشید امکان تولید آب شیرین توسط این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها وجود ندارد. با مجهز کردن آب‌شیرین‌کن به ماده تغییر فاز<sup>۱</sup> می‌توان امکان تولید آب شیرین را در شب فراهم آورد. چون در طی روز ماده تغییر فاز قادر به ذخیره‌سازی حرارت اتلافی از آب‌شیرین‌کن بوده و شب هنگام با بازپس دادن حرارت ذخیره‌شده در خود، باعث تبخیر آب شور و ادامه یافتن تولید آب شیرین در سیستم می‌شود. اتصال گردآورنده فتوولتائیک حرارتی و استفاده از ماده تغییر فاز در آب‌شیرین‌کن خورشیدی دوشیبه جهت بهبود تولید آب شیرین موضوع مورد بررسی تحقیق حاضر می‌باشد. نمونه‌ای از آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه مجهز به ماده تغییر فاز و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در شکل ۱ نشان داده شده است.

مواد تغییر فاز دهنده<sup>۲</sup> حاوی ترکیبات عالی و یا معدنی می‌باشند که قابلیت جذب و ذخیره نهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را در درون خود دارند. ذخیره انرژی گرمایی در این مواد در طی فرایند تغییر فاز (تغییر حالت از جامد به مایع یا بلعکس) اتفاق می‌افتد. این مواد به هنگام تغییر فاز از جامد به مایع یا از مایع به جامد، این گرما را از محیط جذب نموده و یا به محیط پس می‌دهند. ماده تغییر فاز قابلیت آن را دارد که این انرژی نهفته گرمایی را بدون هیچ‌گونه تغییری حتی پس از هزاران چرخه‌ی تغییر فاز درون خود حفظ نماید.

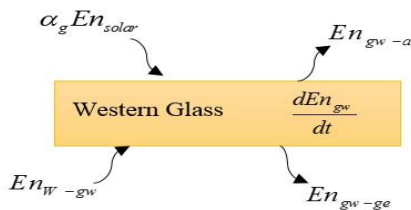
1 Phase Change Material (PCM)  
2 Phase Change Material (PCM)

آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برای یک روز زمستانی و تابستانی و همچنین تأثیر پارامترهای عملکردی و طراحی بر راندمان انرژی است. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شد، سیستم موردنظر ترکیبی از یک آب شیرین کن حوضچه‌ای خورشیدی همراه با ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد و عمل تولید آب در کل شبانه‌روز با توجه به حضور متده تغییر فاز دهنده انجام می‌پذیرد. با توجه به این که در سیستم موردنظر منبع تأمین انرژی در روز خورشید و در شب ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد، به همین دلیل معادلات انرژی آب شیرین کن خورشیدی برای دو حالت شارژ و تخلیه نوشته شده است.

### ۲-۲- تحلیل انرژی آب شیرین کن در حالت شارژ

موازنه‌های انرژی مربوطه برای قسمت‌های مختلف سیستم در حالت شارژ در ادامه بیان شده است.

#### ۲-۲-۱- موازنه انرژی برای شیشه غربی. [۳ و ۴]



$$\alpha_g G_{sw} A_g + h_{w-gw} A_b (T_w - T_{gw}) = h_{c,gw-a} A_g (T_{gw} - T_a) + h_{r,gw-sky} A_g (T_{gw} - T_{sky}) + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) + M_g c_g \frac{dT_{gw}}{dt} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، پارامترهای  $\alpha_g$ ،  $G_{sw}$ ،  $A_g$ ،  $A_b$ ،  $h_{w-gw}$ ،  $h_{c,gw-a}$ ،  $h_{r,gw-sky}$ ،  $h_{r,gw-ge}$ ،  $T_a$ ،  $T_{gw}$ ،  $T_{sky}$ ،  $T_w$ ،  $T_{ge}$ ،  $M_g$  و  $c_g$  به ترتیب ضریب جذب شیشه، شدت تابش خورشید به شیشه غربی، مساحت شیشه، ضریب انتقال حرارت کلی بین آب و شیشه غربی، مساحت صفحه جذب، دمای آب، دمای شیشه غربی، دمای محیط، دمای شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه غربی و محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه غربی و دمای مؤثر محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه غربی و شیشه شرقی، جرم شیشه و ظرفیت گرمایی شیشه می‌باشد.

نرخ برگشت‌ناپذیری در یک گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مینیمم عدد برگشت‌ناپذیری کل سیستم در نرخ جریان جرمی بهینه  $0.02 \text{ kg/s}$  رخ می‌دهد. عدد برگشت‌ناپذیری اختلاف دمای گردآورنده و خورشید با مقدار  $66\%$  بیشترین سهم را در برگشت‌ناپذیری کل سیستم دارد و همچنین سهم عدد برگشت‌ناپذیری مربوط به اتلاف گرما و اصطکاک جریان آب قابل صرف‌نظر است. الهاراشه و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه آزمایشگاهی عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای متصل به گردآورنده خورشیدی معمولی پرداختند. همچنین آن‌ها جهت ذخیره انرژی از یکسری بلوک‌های استوانه‌ای حاوی مواد تغییر فاز دهنده در حوضچه آب شیرین کن استفاده کردند. سیستم مورد مطالعه آن‌ها در طول شبانه‌روز قادر به تولید آب شیرین در حدود  $4300 \text{ day.ml/m}^2$  است که در حدود ۴۰ درصد از این آب شیرین تولیدی شب هنگام به واسطه استفاده از ماده تغییر فاز دهنده تولید شده است.

#### ۱-۳- نوآوری تحقیق حاضر

استفاده همزمان از ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در آب شیرین کن خورشیدی دوشبیه که در تحقیق حاضر به آن پرداخته شده است در تحقیقات گذشته [۸-۱] انجام نشده است. گردآورنده فتوولتائیک حرارتی در ساعات آفتابی روز با پیش‌گرمایش آب شور به بهبود تولید آب شیرین کمک می‌کند و استفاده از ماده تغییر فاز دهنده امکان تولید آب شیرین را شب هنگام نیز فراهم می‌کند. همچنین تحلیل ترمو اقتصادی سیستم ترکیبی مدنظر تحقیق حاضر، انجام نشده است.

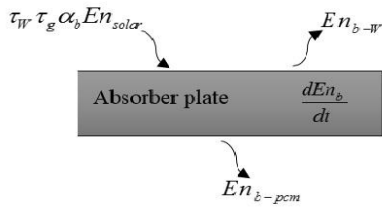
### ۲- معادلات حاکم بر مسئله

در این قسمت به تحلیل انرژی سیستم آب شیرین کن خورشیدی مجهز به ماده تغییر فاز دهنده و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی پرداخته می‌شود. هدف از تحلیل انرژی، به دست آوردن روابطی برای محاسبه دمای قسمت‌های مختلف سیستم همچون دمای شیشه شرقی، دمای شیشه غربی، دمای صفحه جذب، دمای ماده تغییر فاز دهنده و دمای آب شور درون حوضچه می‌باشد. با نوشتن موازنه انرژی برای اجزاء مختلف سیستم، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی مقدار اولیه برای یافتن دماهای ذکر شده به دست خواهد آمد.

#### ۲-۱- تعریف مسئله

هدف اصلی این تحقیق بررسی تئوری میزان تولید آب شیرین در

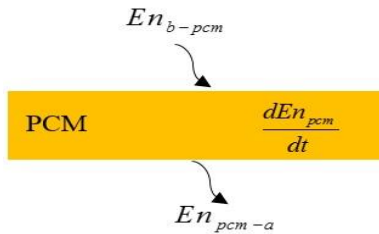
۲-۲-۴- موازنه انرژی صفحه جاذب. [۳ و ۴]



$$\tau_g \tau_w \alpha_b G_s A_b = h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + \frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) + M_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) پارامترهای  $T_w$ ،  $T_b$ ،  $k_{PCM}$ ،  $X_{PCM}$ ،  $T_{PCM}$ ،  $M_b$  و  $c_b$  به ترتیب ضریب عبور آب، دمای صفحه جاذب، هدایت‌پذیری ماده تغییر فاز دهنده، ضخامت ماده تغییر فاز دهنده، دمای ماده تغییر فاز دهنده، جرم صفحه جاذب و ظرفیت گرمایی ویژه صفحه جاذب می‌باشد.

۲-۲-۵- موازنه انرژی ماده تغییر فاز دهنده [۳ و ۴]



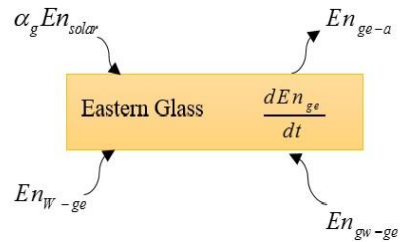
$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_b - T_{PCM}) = \frac{k_{ins}}{X_{ins}} A_b (T_{PCM} - T_a) + M_{equ} \frac{dT_{PCM}}{dt} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) پارامترهای  $k_{ins}$  و  $X_{ins}$  به ترتیب هدایت‌پذیری حرارتی عایق و ضخامت ماده عایق می‌باشد.

$M_{equ}$  ظرفیت حرارتی معادل ماده تغییر فاز دهنده است که در فازهای مختلف از رابطه (۶) به دست می‌آید [۳]:

$$\begin{aligned} M_{equ} &= M_{PCM} C_{s,PCM} \quad , \quad T_{PCM} < T_m \\ M_{equ} &= M_{PCM} L_{PCM} \quad , \quad T_m \leq T_{PCM} \leq T_m + \delta' \\ M_{equ} &= M_{PCM} C_{L,PCM} \quad , \quad T_{PCM} > T_m + \delta' \end{aligned} \quad (۶)$$

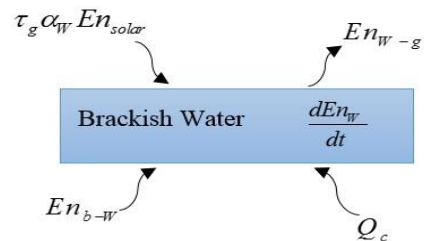
۲-۲-۲- موازنه انرژی برای شیشه شرقی. [۳ و ۴]



$$\begin{aligned} \alpha_g G_{se} A_g + h_{w-ge} A_b (T_w - T_{ge}) + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) &= h_{c,ge-a} A_g (T_{ge} - T_a) \\ + h_{r,ge-sky} A_g (T_{ge} - T_{sky}) + M_g c_g \frac{dT_{ge}}{dt} \end{aligned} \quad (۲)$$

در رابطه (۲) پارامترهای  $G_{se}$ ،  $h_{w-ge}$ ،  $h_{c,ge-a}$ ،  $h_{r,ge-sky}$  و  $T_{sky}$  به ترتیب شدت تابش خورشید به شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت کلی بین آب و شیشه شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه شرقی و محیط، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه شرقی و دمای مؤثر آسمان است.

۲-۲-۳- موازنه انرژی آب درون حوضچه. [۳ و ۴]

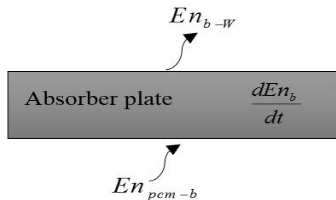


$$\begin{aligned} \tau_g \alpha_w G_s A_b + h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + \dot{Q}_c &= h_{w-gw} A_b (T_w - T_{gw}) + h_{w-ge} A_b (T_w - T_{ge}) \\ + M_w c_w \frac{dT_w}{dt} \end{aligned} \quad (۳)$$

در رابطه (۳) پارامترهای  $G_s$ ،  $\alpha_w$ ،  $\tau_g$ ،  $G_s$ ،  $h_{c,b-w}$ ،  $Q_c$  و  $M_w$  به ترتیب ضریب عبور شیشه، ضریب جذب آب، میانگین شدت تابش خورشیدی ورودی به شیشه غربی و شرقی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و آب، حرارت مفید اضافه‌شده از گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی، جرم آب و ظرفیت گرمایی ویژه آب می‌باشد.

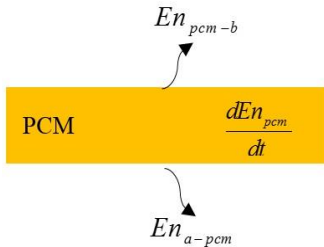
$$h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) = h_{w-gw} A_b (T_w - T_{gw}) + h_{w-ge} A_b (T_w - T_{ge}) + M_w c_w \frac{dT_w}{dt} \quad (۹)$$

۲-۳-۴- موازنه انرژی صفحه جاذب



$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_{PCM} - T_b) = h_{c,b-w} A_b (T_b - T_w) + M_b c_b \frac{dT_b}{dt} \quad (۱۰)$$

۲-۳-۵- موازنه انرژی ماده تغییر فاز دهنده



$$\frac{M_{equ}}{\Delta t} = \frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_{PCM} - T_b) + \frac{k_{ins}}{X_{ins}} A_b (T_{PCM} - T_a) \quad (۱۱)$$

$$T_m \leq T_{PCM} \leq T_m + \delta'$$

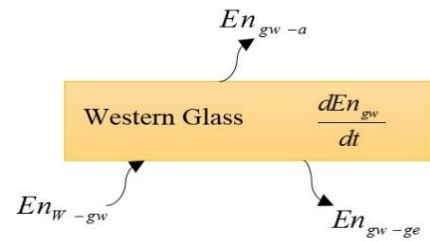
$$\frac{k_{PCM}}{X_{PCM}} A_b (T_{PCM} - T_b) + \frac{k_{ins}}{X_{ins}} A_b (T_{PCM} - T_a) = M_{equ} \frac{dT_{PCM}}{dt}$$

با حل معادلات مذکور دمای اجزای مختلف سیستم به دست می‌آید. با استفاده از دماهای به دست آمده می‌توان گرمای نهان تبخیر آب تبخیر شده را توسط که در محاسبه جرم آب شیرین تولید شده لازم است از رابطه (۱۲) به دست آورد [۹].

۲-۳- تحلیل انرژی آب شیرین کن در حالت تخلیه

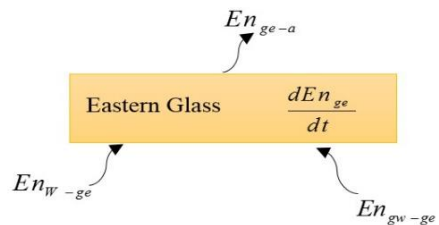
اکنون به موازنه انرژی برای اجزای مختلف آب شیرین کن خورشیدی در حالت تخلیه یعنی زمانی که تابش خورشید وجود ندارد و آب شیرین کن حرارت خود را از ماده تغییر فاز دهنده تأمین می‌کند پرداخته می‌شود.

۲-۳-۱- موازنه انرژی برای شیشه غربی



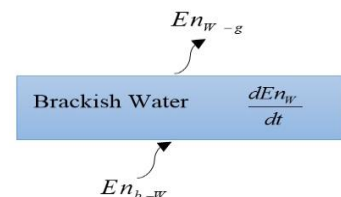
$$h_{w-gw} A_b (T_w - T_{gw}) = h_{c,gw-a} A_g (T_{gw} - T_a) + h_{r,gw-sky} A_g (T_{gw} - T_{sky}) + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) + M_g c_g \frac{dT_{gw}}{dt} \quad (۷)$$

۲-۳-۲- موازنه انرژی برای شیشه شرقی



$$h_{w-ge} A_b (T_w - T_{ge}) + h_{r,gw-ge} A_g (T_{gw} - T_{ge}) = h_{c,ge-a} A_g (T_{ge} - T_a) + h_{r,ge-sky} A_g (T_{ge} - T_{sky}) + M_g c_g \frac{dT_{ge}}{dt} \quad (۸)$$

۲-۳-۳- موازنه انرژی آب درون حوضچه



شرایط مرجع می‌دهد. ثانیاً جزئیات تغییرات پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدارباز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان در نقطه توان ماکزیمم و غیره را بیان نمی‌کند. در تحقیق حاضر جهت محاسبه راندمان مدول فتوولتائیک از مدل چهار پارامتری جریان-ولتاژ استفاده می‌شود؛ مدل چهار پارامتری برای معرفی منحنی  $(I - V)$  سلول خورشیدی به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود [۱۰].

$$I = I_L - I_O \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] \quad (15)$$

چهار پارامتر این مدل  $I_O, I_L, R_s$  و  $a$  به ترتیب مقاومت سری، جریان نوری، جریان اشباع معکوس و ضریب مطلوبیت می‌باشند. برای محاسبه چهار پارامتر موردنظر از روابط (۱۶) تا (۱۹) استفاده می‌شود [۱۰].

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (16)$$

$$I_{O,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp(V_{oc,ref}/a_{ref})} \quad (17)$$

$$a_{ref} = \frac{2V_{mp,ref} - V_{oc,ref}}{\left(\frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref} - I_{mp,ref}}\right) + \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad (18)$$

$$R_{s,ref} = \frac{a_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right) + V_{oc,ref} - V_{mp,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (19)$$

در شرایط مرجع، مقادیر  $I_{mp,ref}$ ،  $V_{mp,ref}$ ،  $I_{sc,ref}$  و  $V_{oc,ref}$  توسط سازندگان مدول‌های فتوولتائیک ارائه می‌شوند. برای محاسبه ولتاژ و جریان و پارامترهای مدل در شرایط جدید  $(T_c, G_c)$ ، از یکسری معادلات انتقال استفاده می‌شود که به صورت روابط (۲۰) تا (۲۷) آورده شده‌اند [۱۰].

$$R_s = R_{s,ref} \quad (20)$$

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (21)$$

$$h_{fg} = 2.4935 \times \left(10^6 - 947.79T_i + 0.13132T_i^2 - 0.0047974T_i^3\right) \quad T_i \leq 70 \quad (12)$$

$$h_{fg} = 3.1615(10^6 - 761.6T_i) \quad T_i \geq 70$$

$T_i$  متوسط دماهای آب، شیشه شرقی و شیشه غربی می‌باشد که از رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$T_i = \frac{T_{gw} + T_{ge} + T_w}{3} \quad (13)$$

## ۲-۴- تحلیل حرارتی و الکتریکی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

هدف از تحلیل حرارتی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی به دست آوردن روابطی برای محاسبه پارامترهایی همچون دمای سطح مدول فتوولتائیک، دمای خروجی و نرخ حرارت جذب شده توسط گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌باشد. با نوشتن موازنه انرژی برای اجزای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل لایه سلول‌های فتوولتائیک، صفحه جاذب و جریان سیال داخل کانال می‌توان عباراتی برای دمای پارامترهای ذکر شده به دست آورد که این روابط در مرجع [۱۴] ذکر شده است. نرخ حرارت مفید جذب شده در گردآورنده فتوولتائیک حرارتی از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c &= F_R b L [(\alpha\tau)_{eff} G_c - u_l (T_{f,in} - T_a)] \\ F_R &= \frac{\dot{m} C_p}{u_l b L} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-F' u_l b L}{\dot{m} C_p}\right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) پارامترهای  $F_R$ ،  $b$ ،  $L$ ،  $(\alpha\tau)_{eff}$ ،  $G_c$ ،  $u_l$ ،  $T_{f,in}$  و  $T_a$  به ترتیب ضریب برداشت گرما، عرض گردآورنده، طول گردآورنده، ضریب جذب-انتقال مؤثر، شدت تابش خورشیدی به گردآورنده، ضریب اتلاف حرارت کلی گردآورنده، دمای آب ورودی به گردآورنده، دمای محیط و ضریب بازده گردآورنده نامیده می‌شوند که نحوه محاسبه هر یک به تفصیل در مرجع [۱۰] آورده شده است. تحلیل الکتریکی که در تحقیقات گذشته استفاده شده است دارای نقص‌هایی می‌باشد. اولاً در شدت تابشی خورشیدی پایین، راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک را برابر با راندمان الکتریکی در



که در آن  $G_N, G_b, G_d, R_r, R_d$  و  $\theta_i$  به ترتیب تابش پراکنده بر سطح افقی، تابش مستقیم زمینی دریافت شده بر سطح زمین، تابش خورشیدی در سطح زمین، ضریب جریان تابش مستقیم تابش شده، بخش بازتابیده شده و زاویه تابش می‌باشند. همچنین  $\rho$  ضریب بازتابش زمین می‌باشد (در زمین معمولی برابر ۰/۲ است).

## ۲-۶- راندمان انرژی

راندمان انرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی متصل به گردآورنده فتوولتائیک حرارتی به صورت نسبت انرژی مطلوب خروجی به انرژی خالص ورودی به سیستم تعریف می‌شود. راندمان انرژی آب‌شیرین‌کن خورشیدی متصل به گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برای دو حالت شارژ و تخلیه به ترتیب به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) بیان می‌شوند. در رابطه (۳۱) ضریب  $C_f$  برای تبدیل انرژی الکتریکی به معادل حرارتی آن استفاده شده است. چون کیفیت انرژی حرارتی و الکتریکی یکسان نمی‌باشد.

$$\eta_{en} = \frac{h_{ev,ge} A_b (T_w - T_{ge}) + h_{ev,gw} A_b (T_w - T_{gw})}{A_b G_s + N A_c G_c} + \frac{V_{mp} I_{mp} - \frac{\dot{m}_w \Delta P}{\eta_p \rho}}{C_f} \quad (31)$$

$$\eta_{en} = \frac{h_{ev,ge} A_b (T_w - T_{ge}) + h_{ev,gw} A_b (T_w - T_{gw})}{\dot{Q}_{PCM,dis}} \quad (32)$$

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- اعتبارسنجی

مجموعه روابط (۱) تا (۱۱) تشکیل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی را می‌دهد. هدف از حل این دستگاه یافتن دما اجزاء مختلف سیستم است. جهت اطمینان از درستی کد نوشته شده برای حل دستگاه معادلات مذکور نیاز به اعتبارسنجی آن با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. چون تحقیق جامعی که دقیقاً منطبق بر تحقیق حاضر باشد یافت نشد، لذا فرایند اعتبارسنجی در دو مرحله به شرح زیر صورت می‌گیرد:

اعتبارسنجی کد نوشته شده برای شدت تابش خورشیدی و گردآورنده

$$\frac{I_o}{I_{O,ref}} = \left( \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{\epsilon_s N_c}{a_{ref}} \right) \left( 1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad (22)$$

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} \left[ I_{L,ref} + \alpha (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (23)$$

$$\Delta T = T_c - T_{c,ref} \quad (24)$$

$$\Delta I = \alpha \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left( \frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc,ref} \quad (25)$$

$$I_{new} = I_{ref} + \Delta I \quad (26)$$

$$V_{new} = V_{ref} + \Delta V \quad (27)$$

در این معادلات  $\epsilon, N_c, \alpha$  و  $\beta$  به ترتیب انرژی شکاف باند، تعداد سلول‌ها در مدول خورشیدی، ضرایب دمایی ولتاژ و جریان است. توان الکتریکی خروجی از مدول فتوولتائیک و راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک به ترتیب به صورت روابط (۲۸) و (۲۹) تعریف می‌شوند:

$$P_{el} = V_{mp} I_{mp} \quad (28)$$

$$\eta_{el} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{G_c A_c} \quad (29)$$

### ۲-۵- تابش خورشید بر سطح شیب‌دار

در معادلات بخش‌های قبل به شدت تابش خورشیدی ( $G$ ) روی سطوح مختلف نیاز می‌باشد؛ لذا در این بخش به محاسبه شدت تابش خورشیدی پرداخته شده است. تابش کل برای هر سطح شیب‌دار (شیب =  $\beta$ ) در هر راستا (برای راستای شرقی، جنوبی، غربی و شمالی)  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  و  $-90^\circ$  در عرض جغرافیایی ( $\phi$ ) را می‌توان با کمک رابطه لیو و جردن [۱۱] محاسبه کرد:

$$G_t = G_N \cos \theta_t + G_d R_d + \rho R_r (G_b + G_d) \quad (30)$$

جدول ۱: پارامترهای جوی، عملکردی و طراحی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Table 1. Atmospheric, operating and design parameters of photovoltaic thermal collector

مقدار	پارامتر گردآورنده فتوولتائیک	مقدار	پارامتر گردآورنده فتوولتائیک
$G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$	شدت تابش خورشیدی در شرایط مرجع	Monocrystalline silicon (۹۰ W)	نوع مدول
$T_{a,ref} = 298/15 \text{ K}$	دمای محیط در شرایط مرجع	$L = 1/3 \text{ m}$	طول مدول فتوولتائیک
$T_{c,ref} = 298/15 \text{ K}$	دمای سطح مدول فتوولتائیک در شرایط مرجع	$b = 0/5 \text{ m}$	عرض مدول فتوولتائیک
$\eta_{el,ref} = 0/1$	راندمان الکتریکی در شرایط مرجع	$I_{sc,ref} = 5/29 \text{ A}$	جریان اتصال کوتاه در شرایط مرجع
$A/^{\circ}\text{C} = 2/0.6 \text{ m } \alpha$	ضریب دمایی جریان	$V_{oc,ref} = 21 \text{ V}$	ولتاژ مدار باز در شرایط مرجع
$V_{mp,ref} = 18/3 \text{ V}$	ولتاژ در نقطه توان ماکزیمم برای شرایط مرجع	$I_{mp,ref} = 4/29 \text{ A}$	جریان در نقطه توان ماکزیمم برای شرایط مرجع
$K_p = 400 \text{ W/m.K}$	قابلیت هدایت صفحه جاذب	$L_p = 0/0.2 \text{ m}$	ضخامت صفحه جاذب

جدول ۲: پارامترهای عملکردی و طراحی آبشیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه

Table 2. Design parameters of the basin type double slope solar still

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$K_{ins} = 0/0.35 \text{ W/m.K}$	ضریب هدایت عایق	$A_b = 2 \text{ m}^2$	مساحت حوضچه
$H = 0/3 \text{ m}$	ارتفاع حوضچه	$\theta = 15^{\circ}$	زاویه پوشش شیشه‌ای
$L_b = 0/0.2 \text{ m}$	ضخامت صفحه جاذب	$A_g = 1/0.35 \text{ m}^2$	مساحت پوشش شیشه‌ای
$L_{ins} = 0/0.05 \text{ m}$	ضخامت عایق	$M_g = 9/92 \text{ kg}$	جرم شیشه
$K_b = 273 \text{ W/m.K}$	ضریب هدایت صفحه جاذب	$M_b = 10/8 \text{ kg}$	جرم صفحه جاذب

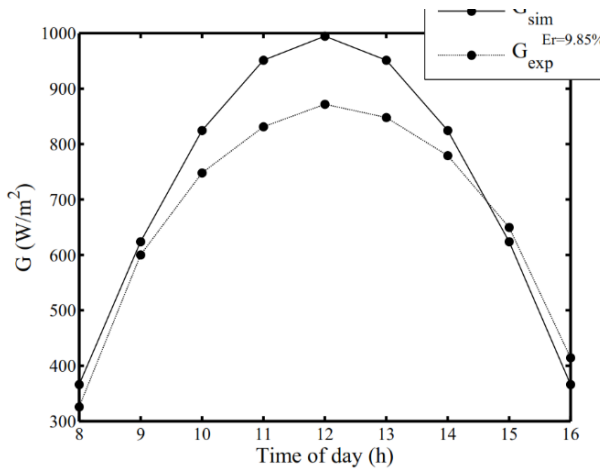
گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان طراحی و ساخته شده است. در شکل ۲ نمایی از دستگاه مذکور نشان داده شده است. پارامترهای مختلف جوی و عملکردی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای آب ورودی و خروجی، دمای سلول خورشیدی، ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، جریان در نقطه توان ماکزیمم و ولتاژ در نقطه توان ماکزیمم در روز ۲۴ آبان ۱۳۹۴ تحت شرایطی که گردآورنده رو به سمت جنوب با زاویه ۳۰ درجه قرار داشته است اندازه‌گیری

فتوولتائیک حرارتی توسط مقایسه با داده‌های دستگاه آزمایش گردآورنده فتوولتائیک حرارتی مستقر در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان.

اعتبارسنجی کد نوشته‌شده برای آبشیرین کن حوضچه‌ای دوشبیه با داده‌های آزمایشگاهی تایواری و همکاران [۴].

یک نمونه آزمایشگاهی از گردآورنده فتوولتائیک حرارتی که شامل یک مدول سیلیکونی ۹۰ وات متصل به یک گردآورنده حرارتی می‌باشد در





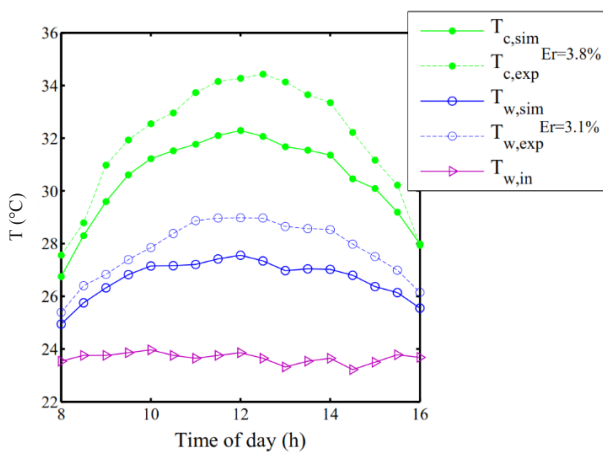
شکل ۳: داده‌های شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی و تجربی برحسب زمان آزمایش

Fig. 3. Experimental and simulated data of solar radiation intensity versus the experiment time



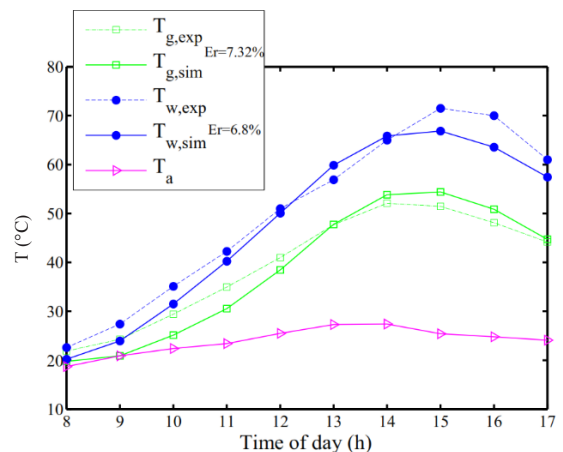
شکل ۲: تصویری از دستگاه آزمایش فتوولتائیک حرارتی مستقر در گروه مهندسی مکانیک دانشگاه سیستان و بلوچستان

Fig. 2. Picture of the photovoltaic thermal collector setup at Department of Mechanical Engineering in University of Sistan and Baluchestan



شکل ۵: دماهای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی برحسب زمان آزمایش

Fig. 5. Different temperatures of the photovoltaic thermal collector versus the experiment time



شکل ۴: مقادیر تجربی و شبیه‌سازی دماهای مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشیبه

Fig. 4. Experimental and simulated values of the various temperatures of the basin type double slope solar still

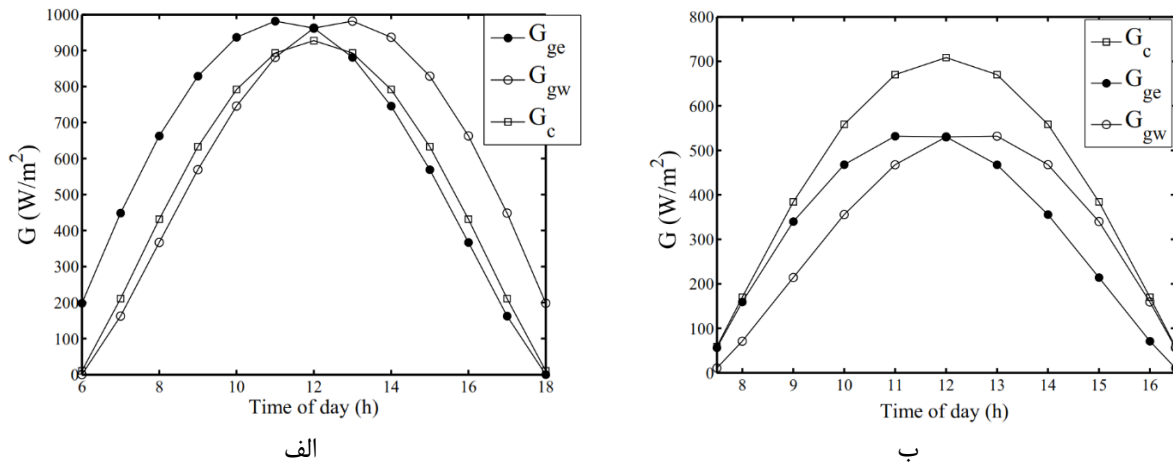
دو حالت شبیه‌سازی و تجربی نشان داده شده است.

در شکل ۳ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی شدت تابش خورشیدی شده است. خطای نسبی شدت تابش مذکور برابر با ۹/۸ درصد می‌باشد.

در شکل ۴ مقادیر تجربی و شبیه‌سازی دماهای مختلف آب‌شیرین‌کن خورشیدی شامل دمای پوشش شیشه‌ای، دمای آب و دمای محیط برحسب زمان آزمایش و در شکل ۵ دماهای مختلف گردآورنده فتوولتائیک حرارتی شامل دمای مدول فتوولتائیک، دمای آب خروجی و دمای آب ورودی

شده است. از آن جایی‌که در تحقیق حاضر شدت تابش خورشیدی برای روز زمستانی و تابستانی توسط رابطه لیو و جردن [۱۱] محاسبه می‌شود؛ لذا علاوه بر پارامترهای حرارتی و الکتریکی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی، مقادیر شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی با داده‌های تجربی دستگاه آزمایش دانشگاه سیستان و بلوچستان مقایسه شده است. در جدول ۱ پارامترهای جوی، عملکردی و طراحی گردآورنده فتوولتائیک حرارتی و در جدول ۲ مشخصات آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای آورده شده است.

در شکل ۳ داده‌های شدت تابش خورشیدی برحسب زمان آزمایش برای



شکل ۶: تغییرات روزانه شدت تابش خورشیدی در روز الف (۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 6. Daily changes in solar radiation on (a) 6 July and (b) 23 December

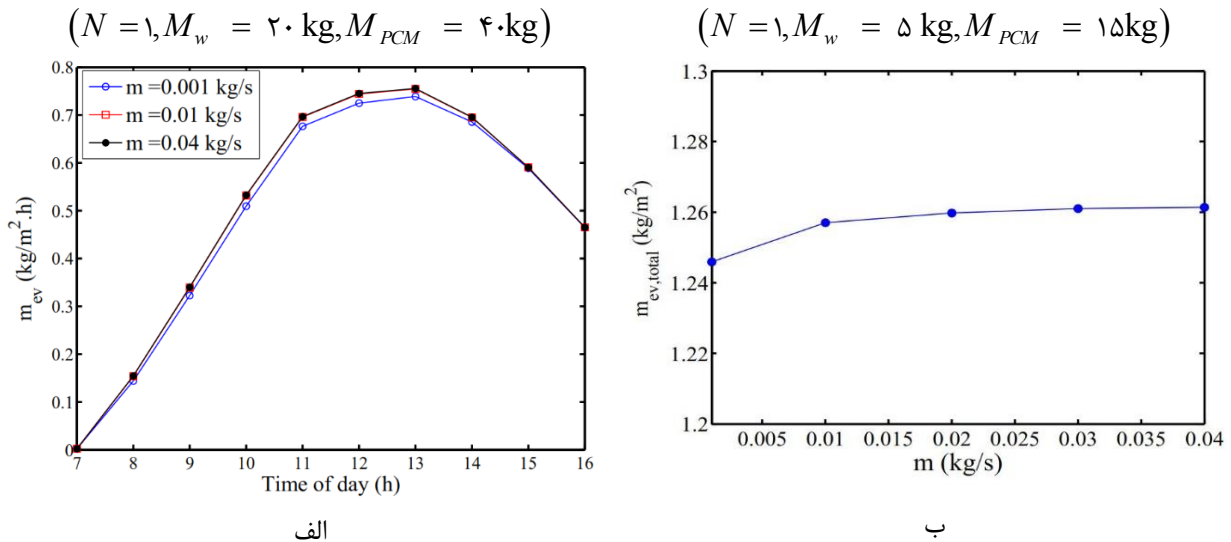
می‌باشد؛ لذا این بازه از جرم برای ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است. برای روز زمستانی مقادیر کمتر از  $5 \text{ kg}$  با توجه به این که مساحت سطح جاذب  $2 \text{ m}^2$  می‌باشد و ماده تغییر فاز دهنده در زیر صفحه جاذب استفاده می‌شود، منجر به ضخامت بسیار ناچیز برای ماده تغییر فاز دهنده می‌گردد. همچنین افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده بیشتر از مقادیر گفته‌شده، کاهش زیاد دمای ماده تغییر فاز دهنده را به دنبال دارد و به تغییر فاز نمی‌رسد که مطلوب نیست؛ لذا حد بالای آن  $15 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. در روز ۱۵ تیر با توجه به بالا بودن شدت تابش خورشیدی و دمای محیط مقادیر کمتر از  $30$  کیلوگرم، ماده تغییر فاز دهنده را از حالت تغییر فاز خارج می‌کند و دمای آن بیش از  $(56^\circ \text{C})$  می‌شود که نامطلوب می‌باشد؛ لذا حد پایین آن  $5 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. محدوده تغییرات جرم آب‌شور درون حوضچه با توجه به میزان تولید آب شیرین در نظر گرفته شده است. در تابستان برای حوضچه  $2 \text{ m}^2$  در حدود  $13 \text{ kg}$  آب شیرین تولید می‌شود لذا کمترین مقدار آب‌شور  $20 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است و برای زمستان در حدود  $2/6 \text{ kg}$  آب شیرین تولید می‌شود، به همین دلیل مقدار  $5 \text{ kg}$  برای آب‌شور درون حوضچه در نظر گرفته شده است. از آنجایی که حوضچه دارای یک ظرفیت محدود می‌باشد و از طرفی افزایش جرم آب‌شور باعث سنگینی دستگاه موردنظر می‌شود، مقادیر ماکزیمم آب‌شور درون حوضچه برای تابستان مقدار  $50 \text{ kg}$  و برای زمستان  $20 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ تغییرات روزانه شدت تابش خورشیدی شبیه‌سازی شده برای روزهای ۱۵ تیر و ۲ دی رسم شده است.

برحسب زمان آزمایش ترسیم شده است.

مطابق شکل ۴ مقایسه‌ای بین مقادیر تجربی مربوط به تحقیق تایواری و دیویدی [۴] و مقادیر شبیه‌سازی تحقیق حاضر برای دماهای آب‌شور درون حوضچه و پوشش شیشه‌ای انجام شده است. خطای نسبی متوسط دماهای مذکور به ترتیب برابر با  $6/8\%$  و  $7/32\%$  می‌باشد. با توجه به شکل ۵ مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه‌سازی و تجربی دماهای مدول فتوولتائیک و دمای آب خروجی انجام شده است. خطای نسبی متوسط دماهای مذکور به ترتیب برابر  $3/8\%$  و  $3/1\%$  می‌باشد. به دلیل این که در ساعات میانی روز مقدار شدت تابش خورشیدی زیاد است و بین مقادیر شبیه‌سازی شده و تجربی شدت تابش در این بازه اختلاف بیشتری وجود دارد، لذا افزایش خطایی بیشتری بین دماهای شبیه‌سازی و تجربی در این محدوده وجود دارد.

### ۳-۲- مطالعات پارامتری بر روی میزان تولید آب شیرین

در این بخش به بررسی تأثیر پارامترهای طراحی و عملکردی شامل دبی جرمی آب‌شور، تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی و جرم آب درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین سیستم پرداخته می‌شود. محدوده تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده برای روز ۱۵ تیر از  $30 \text{ kg}$  تا  $40 \text{ kg}$  و برای روز ۲ دی از  $5 \text{ kg}$  تا  $15 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. به این دلیل که برای روز زمستان دمای محیط به‌طور متوسط  $25^\circ \text{C}$  و شدت تابش خورشیدی در حدود  $50\%$  کمتر از روز تابستانی است. از طرفی هدف استفاده از ماده تغییر فاز دهنده رسیدن به دمای نقطه ذوب  $(56^\circ \text{C})$  برای ذخیره انرژی بیشتر



شکل ۷: تأثیر تغییرات دبی جرمی آب شور بر میزان تولید آب شیرین سیستم در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 7. Effects of changes in mass flow rate of the saline water on the fresh water production on (a) 6 July and (b) 23 December

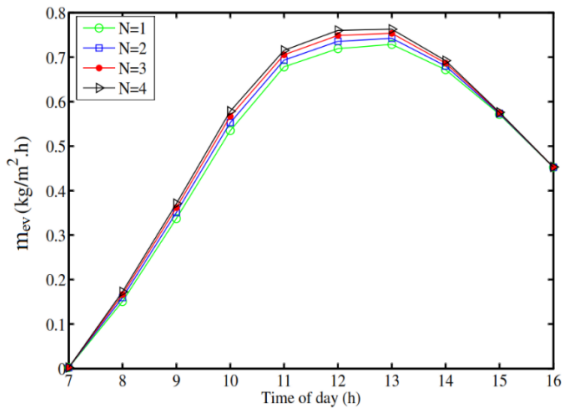
همان‌طور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود، شدت تابش خورشیدی برای ۱۵ تیر نسبت به ۲ دی دارای بازه طولانی‌تر و همچنین مقادیر شدت تابش بیشتری می‌باشد؛ به طوری که در مجموع حدود ۵۰٪ کاهش شدت تابش خورشیدی برای روز ۲ دی نسبت به ۱۵ تیر مشاهده می‌شود. در شکل ۷ تأثیر تغییرات دبی جرمی آب شور بر میزان تولید آب شیرین سیستم در روزهای ۱۵ تیر و ۲ دی مشاهده می‌شود. مقادیر ثابت در ترسیم نمودار مربوطه در بالای آن داده شده است.

افزایش دبی جرمی آب شور باعث تبدیل رژیم جریان آرام به مغشوش در گردآورنده فتوولتائیک حرارتی می‌شود. لذا دمای آب شور درون حوضچه و متعاقب آن نرخ انتقال حرارت تبخیری درون محفظه آب‌شیرین‌کن زیاد می‌شود که این موضوع باعث افزایش تولید آب شیرین می‌گردد. ولی افزایش دمای آب شور درون حوضچه به واسطه افزایش دبی جرمی آب شور در یک سیستم از یک حد به بعد مطلوب نبوده و باعث اتلافات حرارت از سیستم می‌گردد و این موضوع باعث می‌شود که مقدار تولید آب شیرین در مقادیر جرمی بالا به یک عدد ثابت میل کند. در شکل ۷-الف تأثیر تغییرات دبی جرمی آب شور بر میزان تولید آب شیرین به صورت روزانه برای مدت‌زمانی که شدت تابش خورشیدی وجود دارد برای ۱۵ تیر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که دبی جرمی آب شور از  $0.001$  kg/s به  $0.01$  kg/s تغییر می‌کند میزان تولید آب شیرین در حدود

۱۰/۶ درصد افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر دبی جرمی همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود تأثیر بسیار ناچیزی در تولید آب شیرین دارد و می‌توان آن را نادیده گرفت. در زمستان با توجه به این که دمای محیط و شدت تابش خورشیدی افت چشم‌گیری پیدا می‌کند، میزان تولید آب شیرین در کل روز نسبت به تابستان با کاهش قابل توجهی می‌شود و به همین دلیل تغییرات دبی جرمی تأثیر چندانی در تولید آب شیرین ندارد. لذا در شکل ۷-ب تأثیر تغییرات دبی جرمی بر میزان کلی تولید آب شیرین بررسی شده است که از دبی جرمی  $0.01$  kg/s به بعد تولید آب شیرین تقریباً ثابت است. شکل ۸ تأثیر تغییرات تعداد گردآورنده فتوولتائیک حرارتی بر میزان تولید آب شیرین را نشان می‌دهد.

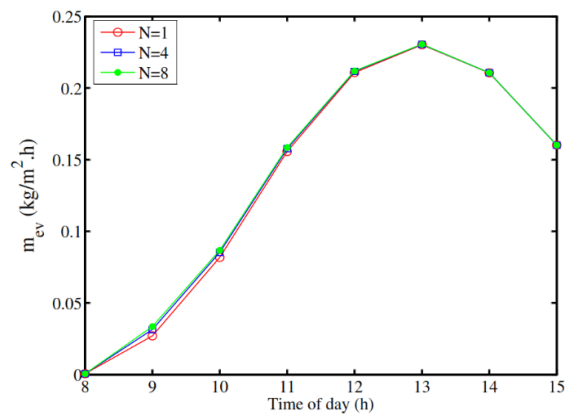
همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی میزان تولید آب شیرین افزایش می‌یابد. افزایش تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی باعث افزایش دمای آب شور درون حوضچه و به تبع آن افزایش نرخ انتقال حرارت تبخیری درون محفظه آب‌شیرین‌کن و به دنبال آن افزایش مقدار تولید آب شیرین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود در تابستان بیشترین مقدار تولید آب با افزایش تعداد گردآورنده‌ها از ۱ عدد به ۲ عدد رخ می‌دهد به طوری که در حدود ۷ درصد به میزان تولید آب افزوده می‌شود و با افزایش بیشتر تعداد گردآورنده میزان تولید آب شیرین به مقدار ثابتی میل می‌کند. با توجه به شکل ۸-ب

$$(\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}, M_w = 20 \text{ kg}, M_{PCM} = 40 \text{ kg})$$



الف

$$(\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}, M_w = 5 \text{ kg}, M_{PCM} = 15 \text{ kg})$$

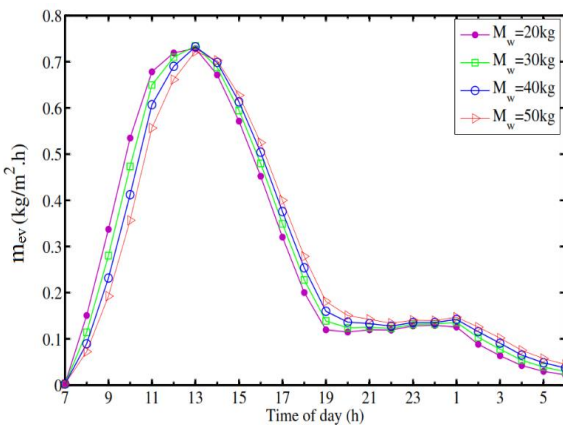


ب

شکل ۸: تأثیر تغییرات تعداد گردآورنده فتوولتائیک حرارتی بر میزان تولید آب شیرین در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

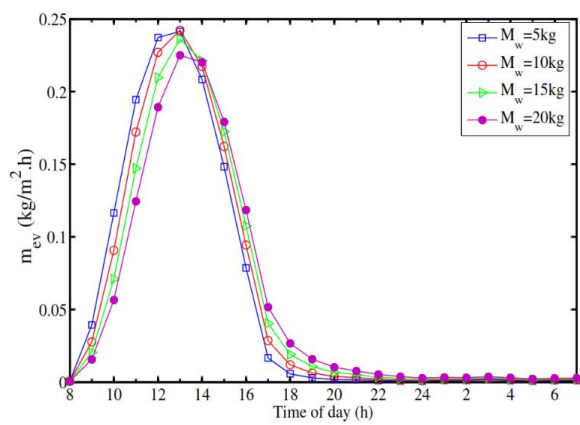
Fig. 8. Effects of the number of photovoltaic thermal collectors on the fresh water production in (a) 6 July and (b) 23 December

$$(\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}, M_{PCM} = 40 \text{ kg}, N = 2)$$



الف

$$(\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}, M_{PCM} = 15 \text{ kg}, N = 1)$$



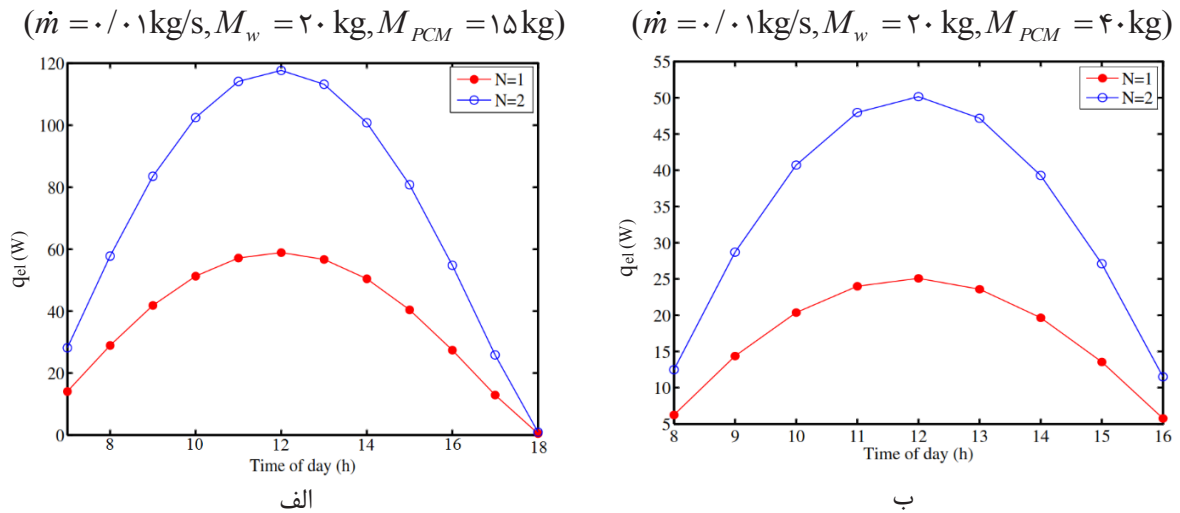
ب

شکل ۹: تغییرات جرم آب شور درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین در روز الف) ۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 9. Changes in the saline water mass into the basin on fresh water production on (a) 6 July and (b) 23 December

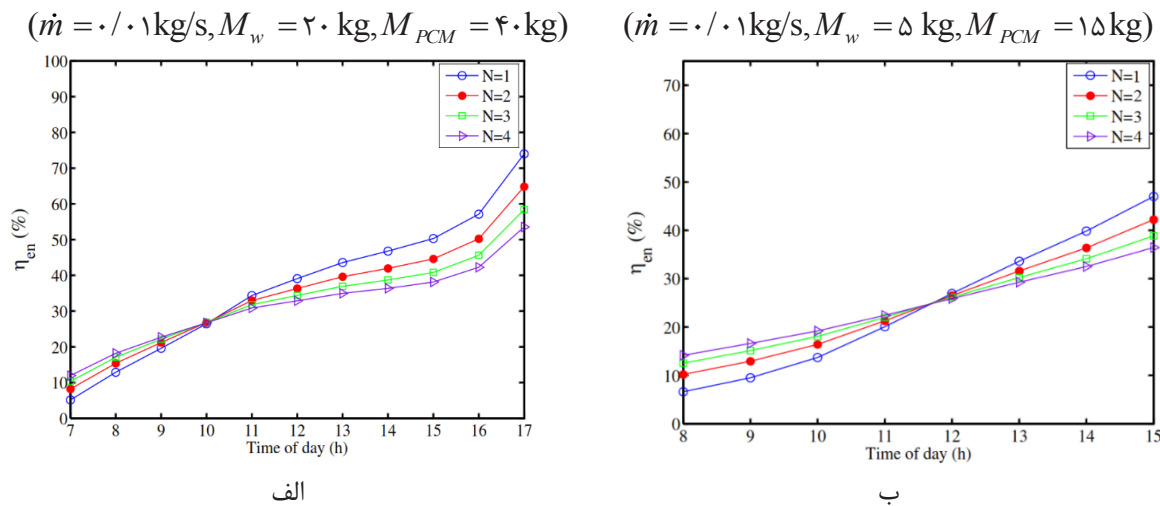
همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود افزایش جرم آب درون حوضچه باعث کاهش میزان تولید آب در روز و افزایش مقدار آن در مابقی ساعات شبانه روز می شود به طوری که در ۱۵ تیر با افزایش جرم آب از ۲۰ kg به ۳۰ kg میزان تولید آب در روز در حدود ۴/۸۲٪ کاهش می یابد ولی در شب در حدود ۷/۴۳٪ افزایش می یابد و به طور کلی میزان تولید آب شیرین در شبانه روز با افزایش جرم آب شور درون حوضچه افزایش می یابد. افزایش بیش از حد آب شور درون حوضچه هم باعث سنگین شدن سیستم مورد نظر

در زمستان به دلیل این که شدت تابش خورشیدی بر روی گردآورنده نسبت به تابستان کاهش فراوانی دارد و همچنین میزان تولید آب شیرین سیستم کم می باشد تأثیر افزایش تعداد گردآورنده ها بر تولید آب بسیار ناچیز است و می توان گفت تعداد گردآورنده مناسب برای سیستم در زمستان همان یک گردآورنده می باشد. در شکل ۹ با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب دبی جرمی آب شور و تعداد گردآورنده به بررسی تغییرات جرم آب شور درون حوضچه بر میزان تولید آب شیرین در دو روز ۱۵ تیر و ۲ دی پرداخته شده است.



شکل ۱۰: مقدار توان الکتریکی خروجی از سیستم برای روز الف (۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 10. Output electrical power of the system on (a) 6 July and (b) 23 December

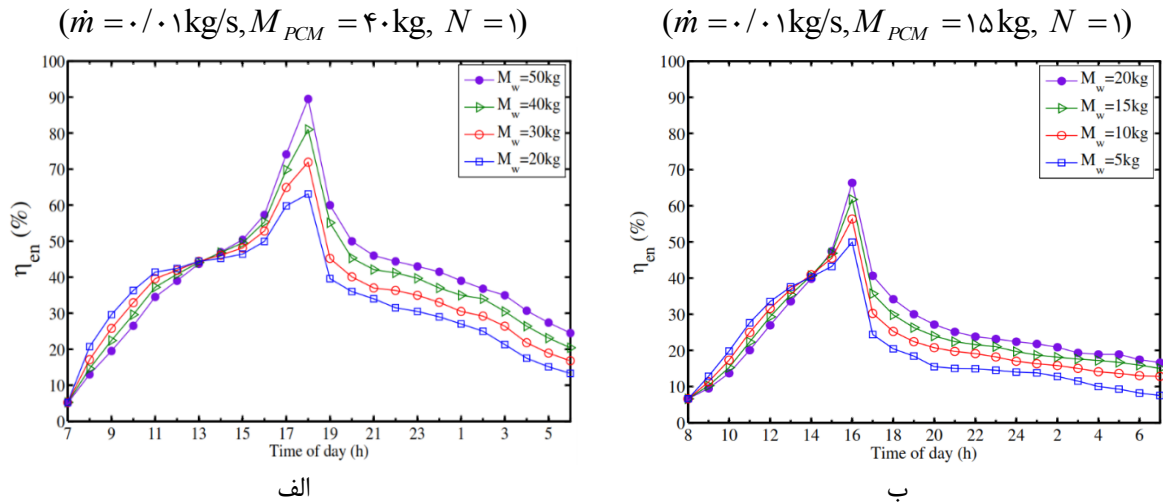


شکل ۱۱: تغییرات راندمان انرژی روزانه سیستم را برحسب تغییرات تعداد گردآورنده برای روز الف (۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 11. Changes in the daily energy efficiency of the system with changes in numbers of photovoltaic thermal collectors for (a) 6 July and (b) 23 December

خروجی از سیستم را برای ۲ روز ۱۵ تیر و ۲ دی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در ساعات اولیه و انتهایی روز به دلیل پایین بودن شدت تابش خورشیدی، توان الکتریکی خالص خروجی نسبت به سایر ساعات روز کمتر می‌باشد. در حوالی ظهر با توجه به بالا بودن شدت تابش خورشیدی می‌توان انتظار داشت که بیشترین توان الکتریکی خالص خروجی در این ساعات رخ می‌دهد. در ۲ دی به دلیل کاهش شدت تابش نسبت به ۱۵ تیر توان الکتریکی خالص خروجی در این روز بیش از

می‌شود و هم اینکه در نهایت مقدار تولید آب شیرین به یک عدد ثابت میل می‌کند. از این رو جرم مطلوب برای ۱۵ تیر  $50 \text{ kg}$  و برای زمستان  $20 \text{ kg}$  در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب دبی جرمی آب شور، تعداد گردآورنده و جرم آب شور درون حوضچه مقدار تولید آب شیرین سیستم در تابستان برابر با  $6/5 \text{ kg/m}^2$  و در زمستان برابر  $1/3 \text{ kg/m}^2$  می‌باشد. ملاحظه می‌شود که مقدار تولید آب در زمستان با توجه به شرایط محیطی کاهش چشم‌گیری نسبت به تابستان دارد. شکل ۱۰ مقدار توان الکتریکی



شکل ۱۲: تغییرات روزانه راندمان انرژی برحسب جرم آب شور درون حوضچه برای روز الف (۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 12. Daily changes of energy efficiency in terms of the saline water mass in the basin for (a) 6 July and (b) 23 December

۱۰۰٪ کاهش نسبت به تابستان را دارا می‌باشد.

### ۳-۳- مطالعات پارامتری از دیدگاه راندمان انرژی

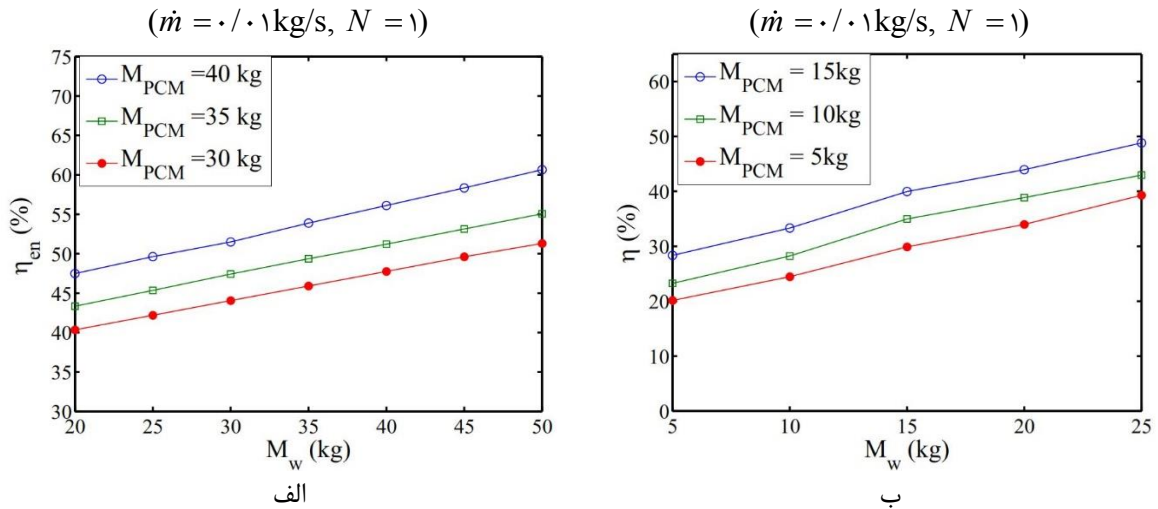
در این بخش به بررسی تغییرات پارامترهای طراحی و عملکردی بر راندمان انرژی روزانه سیستم پرداخته می‌شود. پارامترهای طراحی و عملکردی مورد مطالعه شامل دبی خروجی آب شور، تعداد گردآورنده‌های فتوولتائیک حرارتی، جرم آب شور درون حوضچه و جرم ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. شکل ۱۱ تغییرات راندمان انرژی روزانه سیستم را برحسب تغییرات تعداد گردآورنده نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱ با افزایش تعداد گردآورنده میزان راندمان انرژی در ابتدای روز افزایش پیدا می‌کند و از ساعتی به بعد با کاهش مواجه می‌شود زیرا در ابتدای روز شدت تابش خورشیدی بر روی گردآورنده‌ها و همچنین دمای آب درون حوضچه کم می‌باشد. در این حالت افزایش در تعداد گردآورنده منجر به افزایش قابل ملاحظه دمای آب درون حوضچه و تولید آب شیرین می‌گردد در نتیجه میزان راندمان انرژی افزایش می‌یابد. باگذشت زمان شدت تابش خورشیدی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و از طرفی آب در دمای بالایی می‌باشد و افزایش تعداد گردآورنده‌ها نقش چندانی در ازدیاد دمای آب ندارد که این موضوع منجر به کاهش راندمان انرژی می‌شود. شکل ۱۲ تغییرات روزانه راندمان انرژی برحسب جرم آب شور درون حوضچه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، در روز با افزایش ارتفاع

آب شور درون حوضچه ضریب عبور آب کاهش می‌یابد. کاهش ضریب عبور آب باعث کاهش تابش خورشیدی جذب شده توسط صفحه جاذب می‌شود و همچنین افزایش ارتفاع آب شور درون حوضچه باعث می‌شود آب با لایه ضخیم‌تر دیرتر تبخیر شود و در نتیجه نرخ انتقال حرارت تبخیری در سیستم کاهش می‌یابد. در مجموع اثر توأم این دو موضوع کاهش راندمان انرژی سیستم را به دنبال دارد؛ اما در شب با توجه به این که ماده تغییر فاز دهنده تأمین کننده انرژی است و گرمای تولید شده نیازی به عبور آب ندارد، دمای آب در انتهای روز به حداکثر مقدار خود می‌رسد. به دلیل بالا بودن ظرفیت گرمایی آب، می‌توان گفت که آب مانند یک ماده تغییر فاز دهنده حرارت را در خود نگه می‌دارد و این امر موجب افزایش راندمان سیستم می‌شود و همچنین مقدار جهشی که در راندمان انرژی در انتهای روز مشاهده می‌شود. به این دلیل است که مقیاس سنجش راندمان انرژی تغییر می‌کند و انرژی ورودی به سیستم از آن زمان به بعد توسط ماده تغییر فاز دهنده تأمین می‌شود. شکل ۱۳ راندمان انرژی متوسط روزانه را برحسب تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده و جرم آب نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۳ متوسط راندمان انرژی در شبانه‌روز با افزایش جرم آب افزایش می‌یابد؛ همچنین در این شکل مشاهده می‌شود افزایش جرم ماده تغییر فاز دهنده نیز باعث افزایش متوسط راندمان انرژی می‌شود. در شکل ۱۳ روند تغییرات راندمان انرژی برای ۱۵ تیر و ۲ دی نشان داده شده است که در ۲ دی راندمان انرژی نسبت به ۱۵ تیر به میزان ۳۷/۵٪ کمتر است.





شکل ۱۳: راندمان انرژی متوسط روزانه را برحسب تغییرات جرم ماده تغییر فاز دهنده و جرم آب برای روز الف (۱۵ تیر، ب) ۲ دی

Fig. 13. Average daily energy efficiency with the changes of PCM mass and saline water mass for (a) 6 July and (b) 23 December

$$ASC = SFF (S) \quad (37)$$

$$AMC = 0.15 (AFC) \quad (38)$$

$$TAC = AFC - ASC + AMC \quad (39)$$

در روابط (۳۳) تا (۳۵)،  $i$  و  $p$  به ترتیب طول عمر دستگاه، نرخ تنزیل و هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد. در تحلیل اقتصادی فت و همکارانش [۱۲] به میزان تولید آب شیرین در یک سال نیاز می‌باشد که از حاصل ضرب تولید روزانه در ۳۶۵ روز سال به دست می‌آید. از آنجایی که در تحقیق حاضر به بررسی میزان تولید آب شیرین در یک روز گرم تابستانی (۱۴ تیر) و یک روز سرد زمستانی (۲ دی) پرداخته شد و آب شیرین در این دو روز از سال به ترتیب  $6/5 \text{ kg/s}$  و  $1/3 \text{ kg/s}$  به دست آورده شد لذا در محاسبات اقتصادی از میانگین این دو مقدار برای برآورد تولید سالیانه استفاده گردید. هزینه تمام‌شده دستگاه شامل تجهیزات، جوشکاری و نیروی انسانی می‌باشد که در جدول ۳ قیمت هر یک از اجزا و قیمت نهایی برآورد شده نشان داده شده است.

به منظور مقایسه اقتصادی تحقیق حاضر با سایر پروژه‌ها، قیمت تمام‌شده دستگاه با توجه به نرخ دلار (۴۲۰۰ تومان) در حدود ۳۳۷ دلار تخمین زده شده است. در جدول ۴ محاسبات اقتصادی انجام‌شده مربوط به تحقیق

### ۳-۴- تحلیل اقتصادی

هدف از تحلیل اقتصادی، محاسبه هزینه یک لیتر آب تولید شده می‌باشد. در این تحقیق از تحلیل اقتصادی فت و همکاران [۱۲] استفاده شده است. از جمله این پارامترهای مؤثر بر هزینه تولید آب شیرین در سیستم‌های آب شیرین‌کن خورشیدی می‌توان به ضریب بازگشت سرمایه، ضریب نزول سرمایه، هزینه ثابت سالیانه، ارزش اسقاطی، ارزش اسقاطی سالیانه، هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه و هزینه سالیانه به ازای مترمربع اشاره کرد که به ترتیب توسط روابط (۳۳) تا (۳۹) به دست آورده می‌شوند.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (33)$$

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (34)$$

$$AFC = CRF (P) \quad (35)$$

$$S = 0.1 (P) \quad (36)$$



جدول ۳: قیمت اجزای تشکیل دهنده سیستم آب شیرین کن خورشیدی همراه با گردآورنده فتوولتائیک حرارتی

Table 3. Price of components for solar still system with photovoltaic thermal collector

اجزا	مقدار	قیمت واحد (تومان)	قیمت کل (تومان)
شیشه با ضخامت ۴ میلی‌متر	۳ m <sup>2</sup>	۸/۰۰۰	۲۴/۰۰۰
گردآورنده فتوولتائیک حرارتی	۱	۸۰۰/۰۰۰	۸۰۰/۰۰۰
ماده تغییر فاز دهنده (واکس پارافین)	۴۰ kg	۳/۰۰۰	۱۲/۰۰۰
ورق فولادی گالوانیزه	۴ m <sup>2</sup>	۱۲/۵۰۰	۵۰/۰۰۰
پمپ آب جریان مستقیم	۱	۲۰۰/۰۰۰	۲۰۰/۰۰۰
لوله گالوانیزه	۴ m	۱۲/۰۰۰	۴۸/۰۰۰
نیروی انسانی	-	-	۱۵۰/۰۰۰
چسب آکواریوم	۲	۱۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰
عایق	۴ m <sup>2</sup>	۲/۰۰۰	۶/۰۰۰
قیمت کل	-	-	۱/۴۱۸/۰۰۰

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی عددی تحقیق حاضر برای آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای دوشبیه و گردآورنده فتوولتائیک حرارتی متصل به آن در توافق خوبی با داده‌های تجربی تحقیقات گذشته می‌باشد.

با بررسی‌های انجام شده برای دو روز ۱۵ تیر و ۲ دی در شهر زاهدان، میزان تولید کل آب شیرین روزانه و توان الکتریکی کل خالص خروجی روزانه سیستم به ترتیب برابر با  $6/5 \text{ kg/m}^2$ ،  $1/3 \text{ kg/m}^2$ ،  $470 \text{ W.h/m}^2$  و  $160 \text{ W.h/m}^2$  می‌باشد که توانایی پتانسیل سیستم در تأمین آب شیرین و برق را برای مصارف خانگی نشان می‌دهد.

مقادیر به دست آمده برای تولید آب شیرین و توان الکتریکی در ۲ دی نشان می‌دهد که سیستم در زمستان دارای عملکرد چندان مناسبی نمی‌باشد و بیشترین بازده را فصولی که شدت تابش خورشیدی و دمای محیط مناسب باشد، دارد.

تحلیل اقتصادی انجام شده و مقایسه با تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که سیستم مورد مطالعه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد و همچنین علاوه بر تولید آب، انرژی الکتریسیته نیز تولید می‌کند.

با افزایش جرم آب شور درون حوضچه راندمان انرژی سیستم به صورت روزانه در ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد اما در مجموع به صورت متوسط روزانه راندمان اکسرژی و انرژی افزایش می‌یابد.

حاضر، تحقیق فائق و همکاران [۱۳] و جعفری مصلح و همکاران [۱۴] آورده شده است.

هزینه تمام شده مطابق با تحلیل اقتصادی به ازای واحد سطح برای مطالعه حاضر  $0/314$  دلار برای هر لیتر آب شیرین محاسبه شد و همچنین هزینه آب شیرین تولید شده مطابق با داده‌های ارائه شده برای تحقیق فائق و همکاران [۱۳] و جعفری مصلح و همکاران [۱۴] به ترتیب  $0/212$  و  $0/478$  دلار برای هر لیتر می‌باشد. با توجه به نرخ دلار (۴۲۰۰ تومان) هزینه آب شیرین تولید شده برای مطالعه حاضر در حدود ۱۳۱ تومان می‌باشد که می‌توان گفت با توجه به اینکه قیمت یک آب معدنی ۱ لیتری در ایران در حدود ۱۰۰۰ تومان است، دستگاه آب شیرین کن مربوطه صرفه اقتصادی دارد. برای مساحت سطح  $2 \text{ m}^2$  تولید آب شیرین روزانه برابر با  $7/8 \text{ l}$  می‌باشد. حال اگر قیمت آب شیرین را حداقل  $200$  تومان در نظر بگیریم در سال که  $2847$  لیتر آب شیرین تولید می‌شود در حدود  $569400$  تومان کاهش هزینه وجود خواهد داشت. اگر مقدار هزینه انجام شده را بر  $569400$  تقسیم کنیم تقریباً بعد از  $2/5$  سال هزینه انجام شده جبران می‌شود. بعد از محاسبه اقتصادی انجام شده ذکر این نکته الزامی است که سیستم آب شیرین کن دارای تولید انرژی الکتریسیته می‌باشد که می‌توان از برق تولیدی آن استفاده کرد.

جدول ۴: تحلیل اقتصادی مطالعه حاضر و مقایسه با سایر سیستم‌های آب‌شیرین‌کن

Table 4. Economic analysis of the present study and comparison with other solar still systems

مطالعه حاضر	جعفری مصلح و همکاران [۱۴]	فائق و همکاران [۱۳]	واحد	پارامترهای اقتصادی
۳۳۷	۵۶۸	۲۰۶	\$	هزینه سرمایه‌گذاری ( $P$ )
۳۳/۷	۵۶/۸	۲۰/۶	\$	ارزش اسقاطی (۱۰ درصد سرمایه اولیه) ( $S$ )
۲۰	۲۰	۲۰	years	طول عمر دستگاه ( $n$ )
۱۰	۱۰	۱۰	(%)	نرخ تنزیل ( $i$ )
۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	۰/۱۱۷	-	ضریب بازگشت سرمایه
۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۷۵	-	ضریب نزول سرمایه
۳۹/۴۲	۶۶/۷۲	۲۴/۱۰	\$	هزینه ثابت سالیانه
۰/۵۸۹	۰/۹۹۲	۰/۳۵۰	-	هزینه اسقاطی سالیانه
۵/۹۱	۱۰/۰۱	۳/۶۱	\$	هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه (۱۵ درصد هزینه ثابت سالیانه)
۴۴/۷۴	۷۵/۷۳	۲۷/۳۶	\$	هزینه سالیانه به ازای مترمربع (هزینه ثابت سالیانه + هزینه تعمیر و نگهداری - هزینه اسقاطی سالیانه)
۳/۹	۴/۰۳	۳/۵۲	l/m <sup>2</sup>	تولید روزانه آب شیرین
۱۴۲۳/۵	۱۵۸۵/۷	۱۲۸۸/۱۵	l/m <sup>2</sup>	تولید سالیانه (تولید روزانه × ۳۶۵)
۹۲۵/۲	۱۰۳۰/۷	۸۳۷/۳	kW.h/m <sup>2</sup>	انرژی مفید سالیانه به ازای واحد سطح (تولید سالیانه × حرارت نهان بخار آب) (حرارت نهان بخار آب = ۰/۶۵ kW.h/L)
۰/۰۲۷۶	۰/۰۴۲۱	۰/۰۱۸۷	\$	هزینه سالیانه آب تقطیر شده به ازای هر لیتر به ازای هر مترمربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر تولید سالیانه)
۰/۰۴۲۶	۰/۰۶۴۷	۰/۰۲۸۷	\$	هزینه سالیانه آب تقطیر شده به ازای هر کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع سطح جذب حرارت (هزینه ثابت سالیانه بر انرژی مفید سالیانه)
۰/۰۳۱۴	۰/۰۴۷۸	۰/۰۲۱۲	\$/l	هزینه تمام شده به ازای هر لیتر آب شیرین

۵- فهرست علائم

		علائم انگلیسی	
مؤثر	<i>eff</i>		$A$ (m <sup>2</sup> )
الکتریکی	<i>el</i>		$b$ (m)
تبخیر	<i>ev</i>	مساحت	$C$ (kJ/kg.K)
تبخیری آب و شیشه	<i>ev, W_g</i>	عرض گردآورنده	$\dot{E}$ (W)
شیشه شرقی	<i>e</i>	ظرفیت گرمایی ویژه	$F_R$
شیشه غربی	<i>gw</i>	توان	$G$ (W/m <sup>2</sup> )
عایق	<i>ins</i>	ضریب برداشت گرما	$h$ (W/m <sup>2</sup> .K)
مواد تغییر فاز دهنده	<i>PCM</i>	شدت تابش خورشید	$k$ (W/m.K)
تشعشعی شیشه شرقی و محیط	<i>r, ge_sky</i>	ضریب انتقال حرارت	$L$ (m)
تشعشعی شیشه شرقی و شیشه غربی	<i>r, ge_gw</i>	ضریب هدایت حرارتی	$m$ (kg)
تشعشعی شیشه غربی و محیط	<i>r, gw_sky</i>	طول مجرای جریان	$M$ (kg)
تشعشعی آب و شیشه	<i>r, W_g</i>	مقدار تولید آب شیرین	$\dot{m}$ (kg/s)
خورشید و شیشه غربی	<i>sw</i>	جرم	$P$ (W)
خورشید و شیشه شرقی	<i>se</i>	دبی جرمی	$Q$ (J)
محیط مؤثر	<i>sky</i>	توان	$q$ (W)
آب، غربی	<i>w</i>	نرخ انتقال حرارت، توان الکتریکی	$T$ (K)
آب و شیشه غربی	<i>W_gw</i>	توان	$X$ (m)
		دما	
		مساحت	

منابع

- [1] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, K. Srithar, Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion and Management*, 49(10) (2008) 2602-2608.
- [2] E. Delyannis, Historic background of desalination and renewable energies, *Solar Energy*, 75(5) (2003) 357-366.
- [3] A. El-Sebaii, A. Al-Ghamdi, F. Al-Hazmi, A.S. Faidah, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy*, 86(7-8) (2009) 1187-1195.
- [4] V. Dwivedi, G. Tiwari, Experimental validation of thermal model of a double slope active solar still under natural circulation mode, *Desalination*, 250(1) (2010) 49-55.
- [5] M. Asbik, O. Ansari, A. Bah, N. Zari, A. Mimet, H. El-Ghetany, Exergy analysis of solar desalination still

علائم یونانی

ضریب جذب، ضریب دمایی جریان	$\alpha$
ضریب انبساط حجمی	$\beta$ (1/K)
راندمان	$\eta$
زاویه شیب شیشه‌ها	$\theta$ (degree)
چگالی	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
ثابت استفان بولتزمن	$\sigma$ (J/m <sup>2</sup> .kg)
ضریب عبور	$\tau$
ضریب جذب- انتقال مؤثر	$\alpha\tau$

زیرنویس

محیط	$a$
جابه‌جایی جاذب و آب	$c, b_W$
جابه‌جایی شیشه شرقی و محیط	$c, ge_a$
جابه‌جایی شیشه غربی و محیط	$c, gw_a$
جابه‌جایی آب و شیشه	$c, w_g$
گردآورنده	$c$
سلول	$cell$
هدایت	$cond$
جابه‌جایی	$conv$

- [10] 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.
- [11] B.Y.H. Liu, R.C. Jordan, Daily insolation on surfaces tilted towards equator, *ASHRAE Transactions*, 67 (1962) 526-541.
- [12] H.E.S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, A. Hassabou, Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations, *Desalination*, 159(1) (2003) 69-79.
- [13] M. Faegh, M.B. Shafii, Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes, *Desalination*, 409 (2017) 128-135.
- [14] H. Jafari Mosleh, S. Jahangiri Mamouri, M. Shafii, A. Hakim Sima, A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic trough collector, *Energy Conversion and Management*, 99 (2015) 141-150.
- combined with heat storage system using phase change material (PCM), *Desalination*, 381 (2016) 26-37.
- [6] N. Rahbar, A. Gharaiian, S. Rashidi, Exergy and economic analysis for a double slope solar still equipped by thermoelectric heating modules-an experimental investigation, *Desalination*, 420 (2017) 106-113.
- [7] J. Yazdanpanahi, F. Sarhaddi, Irreversibility rates in a solar photovoltaic/thermal water collector: An experimental study, *Heat Transfer Research*, 48(8) (2017) 741-756.
- [8] M. Al-harashsheh, M. Abu-Arabi, H. Mousa, Z. Alzghoul, Solar desalination using solar still enhanced by external solar collector and PCM, *Applied Thermal Engineering*, 128 (2018) 1030-1040.
- [9] F. Sarhaddi, F. Farshchi Tabrizi, H.A. Zoori, S.A.H.S. Mousavi, Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis, *Energy Conversion and Management*, 133 (2017) 97-109.

