

بررسی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای جاذب معکوس مجهز به سلول‌های فتوولتائیک

معین کریمی تکلو، فرامرز سرحدی*، فاطمه صبح‌نمایان

دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

آب شیرین کن خورشیدی

حوضچه‌ای

جاذب معکوس

سلول‌های فتوولتائیک

تحلیل انرژی

خلاصه: سیستم مورد بررسی در تحقیق حاضر یک آب شیرین کن خورشیدی حوضچه‌ای است که به زیر آن یک بازتابنده منحنی شکل متصل می‌باشد و تعدادی سلول فتوولتائیک بر روی شیشه چگالنده آن تعبیه شده است. بنابراین سیستم مذکور علاوه بر تولید آب شیرین، برق نیز تولید می‌کند. با نوشتن موازنه انرژی برای اجزای مختلف سیستم، عباراتی برای محاسبه دمای سلول فتوولتائیک، دمای شیشه چگالنده، دمای آب و دمای صفحه جاذب به دست آمده است. همچنین بازدهی گرمایی و الکتریکی سیستم نیز معرفی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی تحقیق حاضر در توافق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی مراجع گذشته است. بر مبنای مطالعات پارامتری انجام گرفته مشخص شد که افزایش عمق آب حوضچه، از تولید آب شیرین می‌کاهد و تأثیر آن در تولید برق محسوس نیست. افزایش سلول‌های فتوولتائیک باعث کاهش تولید آب شیرین و افزایش تولید برق می‌شود. افزایش سرعت وزش باد، باعث افزایش تولید آب شیرین و برق می‌شود. افزایش مساحت حوضچه، باعث افزایش تولید آب شیرین و برق می‌شود. همچنین افزایش سلول‌های فتوولتائیک به ترتیب باعث افزایش بازدهی الکتریکی و کاهش بازدهی گرمایی و در مجموع باعث کاهش بازدهی کل سیستم می‌شود. افزایش عمق آب حوضچه در بازدهی الکتریکی بی‌تأثیر است ولی بازدهی گرمایی و در مجموع بازدهی کل سیستم را کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

به فرایندهای آب شیرین کن‌های مبتنی بر منابع انرژی تجدید پذیر از خود نشان داده‌اند. به‌طور معمول اغلب مناطقی که با کمبود آب شرب مواجه هستند از پتانسیل بالای انرژی خورشیدی برخوردار می‌باشند. از این رو استفاده از آب شیرین کن‌های خورشیدی می‌تواند مشکل آب قابل شرب را تا حدود زیادی برطرف کند. شیرین‌سازی آب‌های شور به‌منظور تأمین آب مصرفی به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد. یکی از روش‌های مناسب، تقطیر آب شور دریاها و یا منابع آب‌های زیرزمینی نامطلوب است. تقطیر در واقع روندی است که در آن املاح آب (نظیر نمک) از منابع آب نظیر آب دریا، آب‌های زیرزمینی و پساب‌ها جدا می‌شود. ساده‌ترین روش برای شیرین نمودن آب‌های شور، تقطیر خورشیدی می‌باشد. حال با توجه به این‌که اغلب آب شیرین کن‌های خورشیدی طراحی و ساخت خارج می‌باشند و مناسب برای استفاده در ایران نیستند، تحقیق و پژوهش در این زمینه و دستیابی به این علم ضروری خواهد بود. در گذشته مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه جهان، دستیابی به آب تمیز و قابل آشامیدن ضرورت مهمی تلقی می‌شود. بیشتر منابع آبی، شور و یا حاوی باکتری‌های مضر بوده و قابل آشامیدن نیستند. این در حالی است که تنها سه درصد منابع آب‌های موجود زمین قابل شرب می‌باشند [۱]. در بیشتر کشورهای جهان از جمله ایران کمبود آب شیرین به یک معضل جدی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش قیمت انرژی‌های فسیلی همراه با کاهش منابع آن و مباحث مربوط به آلودگی محیط‌زیست ناشی از استفاده بی‌رویه این سوخت‌ها، استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این منابع، انرژی خورشیدی بوده که به دلیل عدم نیاز به فن‌آوری پرهزینه و پیشرفته می‌تواند به‌عنوان یک منبع مفید به کار گرفته شود. بنابراین بعضی از کشورهای حاشیه خلیج فارس با توجه به اینکه از منابع غنی انرژی خورشیدی بهره‌مند هستند، علاقه زیادی

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

تقطیر خورشیدی به‌عنوان یک فن‌آوری جهت تولید آب شیرین قدمتی طولانی دارد به‌طوری‌که اولین دست‌نوشته‌ها که فرایند تقطیر را توضیح می‌دهد مربوط به قبل میلاد مسیح (ع) می‌شود. در ابتدا هدف اصلی تولید نمک بوده است [۲]. در سال ۱۹۹۴ تایواری و همکاران [۳] حالت بهینه شیب پوشش آب‌شیرین‌کن را برای آب هوای دهلی‌نو در طول سال یافتند. آن‌ها گزارش دادند که در طول تابستان شیب ۱۰ درجه و در طول زمستان شیب ۶۰ درجه بهترین عملکرد را برای آب‌شیرین‌کن دارد. در سال ۱۹۹۹ سونجا و تایواری [۴] به بررسی تأثیر عمق آب بر آب‌شیرین‌کن خورشیدی تک‌شیب جاذب معکوس پرداختند. به این نتیجه رسیدند که بازده روزانه یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس دوگانه با افزایش عمق آب نسبت به حالت یگانه آن افزایش بیشتری دارد. در سال ۱۹۹۹ سانجا و تایواری [۵] به مطالعه پارامتری آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس سه‌گانه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس سه‌گانه عملکرد بهتری نسبت به حالت‌های دوگانه و یگانه آن دارد. در سال ۲۰۰۶ تایواری و سودا [۶] با یک مدل جدید برای یک جمع‌کننده فتوولتائیک مقدار عددی برای دمای مدول فتوولتائیک و آب به‌دست آوردند. در سال ۲۰۰۷ جوشی و تایواری [۷] کارایی گردآورنده‌های فتوولتائیک را براساس مفهوم انرژی و اکسرژی مورد بررسی قرار دادند و بازدهی انرژی را ۵۵ تا ۵۷ درصد و بازدهی اکسرژی را در حدود ۱۲ تا ۱۵ درصد بیان کردند. در سال ۲۰۰۸ کومار و تایواری [۸] عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای فعال را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تولید آب شیرین در آب‌شیرین‌کن فعال نسبت به غیرفعال ۳/۵ برابر بیشتر است. در سال ۲۰۱۱ تایواری و همکاران [۹] به بررسی معادلات مشخصه آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس پرداختند. براساس تجزیه و تحلیل اقتصادی که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که هزینه‌های تولید هر کیلوگرم مترمربع آب تقطیرشده در آب‌شیرین‌کن جاذب معکوس و آب‌شیرین‌کن ساده به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۵۴ روپیه است. در سال ۲۰۱۱ تایواری و همکاران [۱۰] به بررسی تغییرات عمق آب بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس پرداختند. به این نتیجه رسیدند که افزایش عمق آب حوضچه باعث افزایش عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس و همچنین آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساده می‌شود. حداکثر

عمق آب بهینه‌شده برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس ۰/۰۳ متر به‌دست آمد به طوری‌که اضافه کردن بازتابنده به کف حوضچه تأثیر چشم‌گیری روی کارایی آن در مقایسه با آب‌شیرین‌کن ساده نداشت. در سال ۲۰۱۲ عبدالوهاب و همکاران [۱۱] به بررسی عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی جاذب معکوس همراه با چرخه تبرید پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تولید روزانه در آب‌شیرین‌کن خورشیدی همراه با چرخه تبرید با افزایش عمق آب در مقایسه با حالت معمول آب‌شیرین‌کن افزایش بیشتری خواهد داشت. در سال ۲۰۱۳ شاه و دامور [۱۲] اثر مواد جذب‌کننده برای یک آب‌شیرین‌کن دو شیب را بررسی کردند و نشان دادند هنگامی‌که رنگ سیاه استفاده شود حدود ۲۷ درصد عملکرد آب‌شیرین‌کن نسبت به زمانی که رنگ سیاه استفاده نشود بهتر است. در سال ۲۰۱۴ کابیل و همکاران [۱۳] عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی مجهز به چگالنده خارجی را با نانوسیال بررسی کردند. آن‌ها مقداری ذرات اکسید آلومینیوم به داخل آب حوضچه اضافه کردند و گزارش دادند که خواص ترمودینامیکی آب تغییر می‌کند. حضور نانوسیال در حوضچه باعث افزایش دمای آب و در نتیجه تبخیر آن می‌شود. تحقیقات آن‌ها نشان داد زمانی‌که از نانوسیال استفاده می‌شود افزایش قابل توجه در تولید آب شیرین نسبت به حالت معمول رخ می‌دهد. در سال ۲۰۱۵ السبایی و همکاران [۱۴]. تأثیر کاربرد فین در حوضچه آب‌شیرین‌کن را بر عملکرد آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که تولید آب شیرین با ضخامت فین و ارتفاع فین به ترتیب نسبت عکس و مستقیم دارد. افزایش بیش از حد فین‌ها در نتیجه افزایش ایجاد سایه فین‌ها، باعث کاهش تولید آب می‌شود. آن‌ها گزارش دادند در بهترین حالت با کاربرد فین‌ها تولید آب شیرین ۱۳/۷ درصد نسبت به حالت معمول افزایش دارد در سال ۲۰۱۶ افرند و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی بر روی یک مدل حرارتی برای آب‌شیرین‌کن خورشیدی با بازتابنده خارجی پرداختند. مدل حرارتی معرفی شده به‌طور قابل اعتماد مقدار آب تقطیرشده و کارایی سیستم با بازتابنده خارجی را برآورد می‌کند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری سیستم در ساعات اولیه روز کم است، در حالی‌که در بعدازظهر ۴۴ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار آب تولید شده برای حالت تئوری و تجربی به ترتیب ۴۶۰۰ و ۴۳۰۰ میلی‌لیتر در روز است. در سال ۲۰۱۷ اومارا و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر

۵- سلول‌های فتوولتائیک از نوع سیلیکونی می‌باشد.

$$\tau_{g1}\tau_w\alpha_b(1-\beta_c)A_{g1}G_s + \tau_{g2}r_{inv}^N\alpha_bA_{g2}G_s =$$

$$h_{bw}A_b(T_b - T_w) + h_{ba}A_b(T_b - T_a) \quad (6)$$

۲-۳- تحلیل حرارتی

موازنه انرژی برای سلول‌های فتوولتائیک:

$$\alpha_c G_s \beta_c A_{g1} = h_{ca} \beta_c A_{g1} (T_c - T_a) +$$

$$h_{cg1} \beta_c A_{g1} (T_c - T_{g1}) + \beta_c A_{g1} \eta_{el} G_s \quad (1)$$

از موازنه انرژی برای سلول‌های فتوولتائیک معادله‌ای برای دمای

سلول‌های فتوولتائیک به دست می‌آید:

$$T_c = \frac{h_{ca} T_a + h_{cg1} T_{g1} + \alpha_c G_s - \eta_{el} G_s}{h_{ca} + h_{cg1}} \quad (2)$$

موازنه انرژی برای شیشه چگالنده:

$$\alpha_{g1}(1-\beta_c)A_{g1}G_s + h_{wg1}A_b(T_w - T_{g1}) +$$

$$h_{cg1}\beta_c A_{g1}(T_c - T_{g1}) = h_{g1a}(1-\beta_c)A_{g1}(T_{g1} - T_a) \quad (3)$$

از موازنه انرژی برای شیشه چگالنده معادله‌ای برای دمای شیشه

چگالنده به دست می‌آید:

$$T_{g1} = \frac{\alpha_{g1}(1-\beta_c)G_s + h_{wg1}T_w \cos\theta +}{h_{wg1} \cos\theta + h_{cg1}\beta_c}$$

$$\frac{h_{cg1}\beta_c T_c + h_{g1a}(1-\beta_c)T_a}{+ h_{g1a}(1-\beta_c)} \quad (4)$$

موازنه انرژی برای آب درون حوضچه:

از موازنه انرژی برای صفحه جذب معادله‌ای برای دمای صفحه

جذب به دست می‌آید:

$$T_b = \frac{\tau_{g1}\tau_w\alpha_b(1-\beta_c)G_s + \tau_{g2}r_{inv}^N\alpha_bG_s(A_{g2}/A_{g1})}{(h_{bw} + h_{ba})\cos\theta}$$

$$+ \frac{h_{bw}T_w \cos\theta + h_{ba}T_a \cos\theta}{\cos\theta}$$

در ادامه با جایگذاری معادلات (۴) و (۷) در معادله (۵)، یک

معادله دیفرانسیل معمولی برای دمای آب شور درون حوضچه به دست می‌آید.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_w}{dt} + aT_w &= f(t) \\ T_w(0) &= T_{w0} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

از حل معادله دیفرانسیل و متوسط‌گیری زمانی آن، دمای متوسط

آب شور به صورت معادله (۹) به دست می‌آید:

$$T_w = \frac{1}{t} \int_0^t T_w dt = \frac{f_1(t)}{\alpha_1} \left[1 - \frac{1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)}{\alpha_1 \Delta t} \right] +$$

$$T_{w0} \left[\frac{1 - \exp(-\alpha_1 \Delta t)}{\alpha_1 \Delta t} \right]$$

نرخ انرژی تبخیری آب شیرین‌کن و میزان تولید آب شیرین

سیستم در بازه زمانی Δt ، به ترتیب به صورت معادلات (۱۰) و (۱۱)

به دست می‌آید [۴]:

$$\dot{q}_{ev} = h_{ev} A_b (T_w - T_g) \quad (10)$$

$$m_w = \frac{\dot{q}_{ev} \Delta t}{h_{fg}} \quad (11)$$

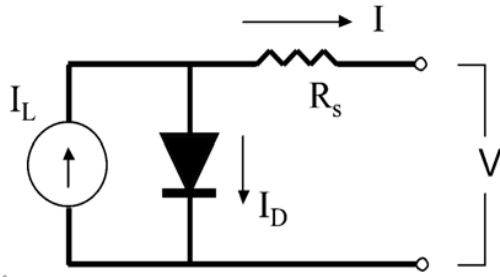
در نهایت بازده حرارتی از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود [۴] و

۱۰:

$$\tau_{g1}\tau_w(1-\beta_c)A_{g1}G_s + h_{bw}A_b(T_b - T_w) =$$

$$M_w c_w \frac{dT_w}{dt} + h_{wg1}A_b(T_w - T_{g1}) + h_{wa}A_s(T_w - T_a)$$

موازنه انرژی صفحه جذب:



شکل ۲: مدل الکتریکی معادل مدل چهار پارامتری [۱۸]

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

در شرایط مرجع مقادیر $I_{mp,ref}$ ، $V_{mp,ref}$ و $I_{sc,ref}$

توسط سازندگان مدول‌های فتوولتائیک ارائه می‌شود.

برای محاسبه ولتاژ، جریان و پارامترهای مدل در شرایط جدید از

یکسری معادلات انتقال استفاده می‌شود که به صورت معادلات (۱۹)

تا (۲۷) آورده شده است [۱۸].

$$R_s = R_{s,ref} \quad (19)$$

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (20)$$

$$\frac{I_O}{I_{O,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{\epsilon_s N_c}{a_{ref}} \right) \left(1 - \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right) \right] \quad (21)$$

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} \left[I_{L,ref} + \alpha (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (22)$$

$$\Delta T = T_c - T_{c,ref} \quad (23)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G}{G_{ref}} - 1 \right) I_{sc,ref} \quad (24)$$

$$\Delta V = \beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (25)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{q}_{ev}}{A_g \times G_s} \quad (12)$$

۲-۴- تحلیل الکتریکی

در تحقیقات گذشته راندمان الکتریکی مدول‌های فتوولتائیک از

رابطه (۱۳) محاسبه شده است:

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} \left[1 - \beta_{ref} (T_c - T_a) \right] \quad (13)$$

سرحدی و همکاران [۱۸]، نشان دادند که معادله (۱۳) نقص‌هایی

دارد. اول این‌که در شدت تابش خورشیدی پایین، راندمان الکتریکی

مدول فتوولتائیک را برابر با راندمان الکتریکی در شرایط مرجع (

$\eta_{el} = \eta_{el,ref}$) می‌دهد. دوم این‌که معادله (۱۳) جزئیات تغییرات

پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ

و جریان در نقطه ماکزیمم، توان الکتریکی و غیره را بیان نمی‌کند.

در این مقاله از مدل چهار پارامتری استفاده شده است. مدل چهار

پارامتری برای معرفی منحنی $(I - V)$ سلول خورشیدی به صورت

رابطه (۱۴) تعریف می‌شود [۱۸].

$$I = I_L - I_O \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{a} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

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.

شکل ۲، مدار الکتریکی مدل چهار پارامتری را نشان می‌دهد.

برای محاسبه چهار پارامتر مدل در شرایط مرجع

($G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ ، $T_{cell,ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) از معادلات (۱۵)

تا (۱۸) استفاده می‌شود [۱۸].

$$I_{L,ref} = I_{sc,ref} \quad (15)$$

$$I_{O,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp(V_{oc,ref} / a_{ref})} \quad (16)$$

$$a_{ref} = \frac{2V_{mp,ref} - V_{oc,ref}}{\left(\frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} - I_{mp,ref} \right) + \ln \left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} \right)} \quad (17)$$

معادله (۳۲) به صورت انرژی خروجی مطلوب نسبت به انرژی ورودی بیان شده است. به دلیل این که از لحاظ کیفیت، انرژی الکتریکی با انرژی گرمایی متفاوت می باشد در صورت کسر، مقدار توان الکتریکی تولیدی بر ضریب ثابت ۰/۳۸ تقسیم شده است.

۶-۲- الگوریتم حل

گام اول: مقداردهی اولیه به پارامترهای ثابت ورودی جوی، عملکردی و طراحی ($N, M_w, K_g, C_w, A_s, A_{g2}, A_{g1}, A_b$)، $\tau_c, \tau_{g1}, \tau_w, \Delta t, \theta, r_{mv}, c_f, \varepsilon_g, \beta_c, \alpha_w, \alpha_c, \alpha_{g1}, \alpha_b$ ، $(T_a \text{ و } G_s)$ ،

گام دوم: حدس اولیه برای دماهای آب، شیشه چگالنده، صفحه جاذب و سلول های فتوولتائیک ($T_{c,in}$ و $T_{b,in}$ ، $T_{g1,in}$ ، $T_{w,in}$)، گام سوم: محاسبه ضرایب انتقال حرارت (h_{wg1}, h_{cg1}, h_{ca})، $(h_{ba} \text{ و } h_{wa}, h_{bw}, h_{g1a})$.

گام چهارم: محاسبه دماهای آب، شیشه چگالنده، صفحه جاذب و سلول های فتوولتائیک (معادلات (۲)، (۴)، (۷) و (۹)). گام پنجم: چک کردن شرط همگرایی ($\left| \frac{T_w - T_{w,in}}{T_w} \right| \leq 0.001$)، اگر شرط همگرایی برقرار باشد به گام بعدی برود. در غیر این صورت مقادیر به دست آمده برای دمای آب، شیشه چگالنده، صفحه جاذب و سلول را به عنوان حدس اولیه در نظر گرفته و به گام سوم برود. گام ششم: محاسبه پارامترهای مطلوب (η_{th}, q_{el}, m_w)، $(\eta_{en} \text{ و } \eta_{el})$.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی

با توجه به معادلات حاکم بر سیستم آب شیرین کن حوضچه ای خورشیدی جاذب معکوس یک کد کامپیوتری نوشته شده است. نتایج شبیه سازی این کد کامپیوتری با نتایج پژوهش تایواری و همکاران [۱۰]، اعتبارسنجی شده است. در این پژوهش تایواری و همکاران به تأثیر عمق آب بر کارایی سیستم آب شیرین کن خورشیدی جاذب معکوس پرداختند. در این قسمت پارامترهای دمای شیشه چگالنده، دمای آب، دمای صفحه جاذب و میزان تولید آب اعتبارسنجی شده است و درصد خطای متوسط آن توسط رابطه زیر گزارش شده است.

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

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

در این معادلات ε, N_c, α و β به ترتیب انرژی شکاف باند، تعداد سلول ها در مدول خورشیدی، ضرایب دمایی ولتاژ و جریان است.

حداکثر توان الکتریکی خروجی از مدول فتوولتائیک به صورت معادله (۲۸) محاسبه می شود [۱۸]:

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

در نهایت بازده الکتریکی مدول فتوولتائیک به صورت معادله (۲۹) محاسبه می شود [۱۸]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{S}} \quad (29)$$

$$\dot{S} = GN_s N_m A_{mod} \quad (30)$$

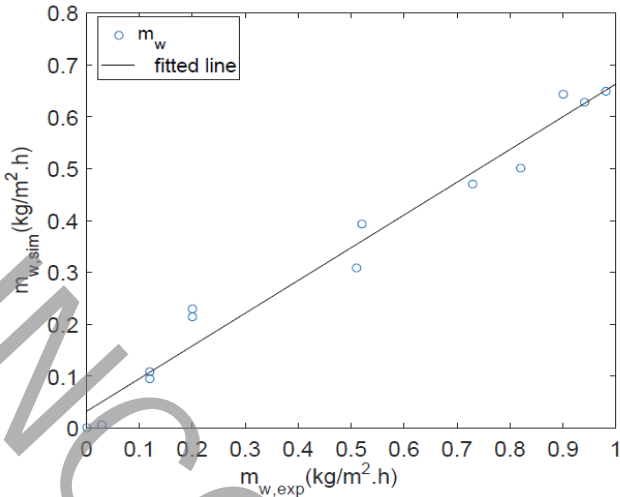
در این معادلات $\dot{S}, A_{mod}, N_s, N_m$ به ترتیب شار خورشیدی رسیده به سطح مدول فتوولتائیک، مساحت سطح سلول فتوولتائیک، تعداد رشته و تعداد سلول ها در هر رشته است. توان الکتریکی تولید شده به صورت معادله (۳۱) به دست می آید [۱۸]:

$$\dot{q}_{el} = \eta_{el} \times A_g \times G_s \quad (31)$$

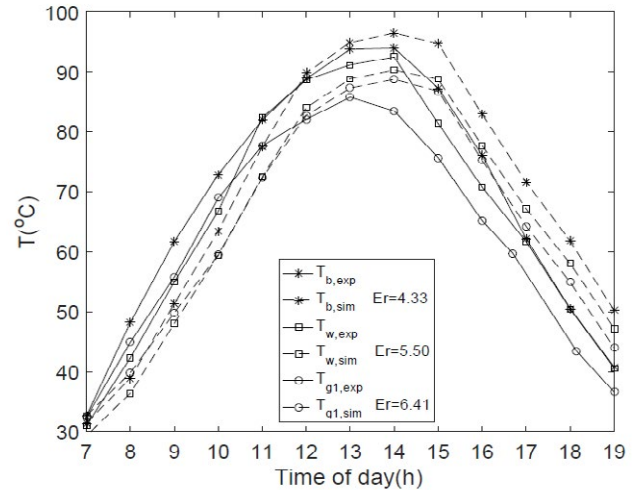
۵-۲- بازده کل سیستم

بازده کلی آب شیرین کن از دیدگاه تحلیل انرژی به صورت معادله (۳۲) محاسبه می شود [۱۰]:

$$\eta_{en} = \frac{\text{Desired.output.energy}}{\text{Input.energy}} = \frac{\dot{E}_{o,des}}{\dot{E}_i} = \frac{\dot{q}_{ev} + (\dot{q}_{el}/C_f)}{A_g \times G_s} \quad (32)$$



شکل ۵: تغییرات مقادیر شبیه سازی میزان کل تولید آب شیرین بر حسب مقادیر تجربی متناظر



شکل ۳: مقادیر شبیه سازی و تجربی دماهای اجزای مختلف آب شیرین کن خورشیدی بر حسب زمان

باشد. در این موارد از ضریب خطی رگرسیون توسط رابطه زیر استفاده می شود [۱۹].

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n X_{exp,i} X_{sim,i} \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_{exp,i} \right) \left(\sum_{i=1}^n X_{sim,i} \right)}{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n X_{exp,i}^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_{exp,i} \right)^2} \sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n X_{sim,i}^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_{sim,i} \right)^2}} \quad (34)$$

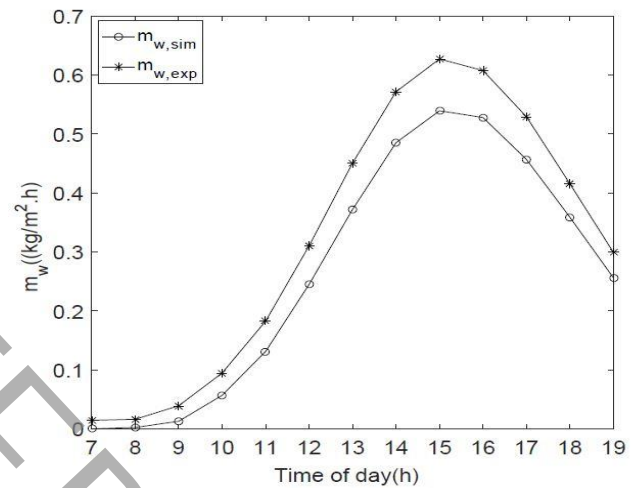
ضریب خطی رگرسیون میزان وابستگی خطی داده های شبیه سازی شده را نسبت به داده های تجربی متناظر نشان می دهد و مقدار آن بین صفر تا یک تغییر می کند. هرچه مقدار خطی رگرسیون به یک نزدیکتر باشد بهتر است.

شکل ۴ میزان تولید آب شیرین را در حالت شبیه سازی و آزمایشگاهی مقایسه می کند.

شکل ۵ میزان تغییرات مقادیر شبیه سازی میزان کل تولید آب شیرین بر حسب مقادیر تجربی متناظر و همچنین ضریب رگرسیون را نمایش می دهد. براساس شکل ۵ رابطه وابستگی داده های شبیه سازی بر حسب داده های تجربی برای میزان کل تولید آب شیرین خطی و ضریب خطی رگرسیون آن برابر ۰/۹۷۹ است.

۳-۲- مطالعات پارامتری

این بخش به بررسی پارامترهای طراحی و عملکردی برای ارزیابی دقیق نقش این پارامترها در عملکرد سیستم می پردازد. مطالعات

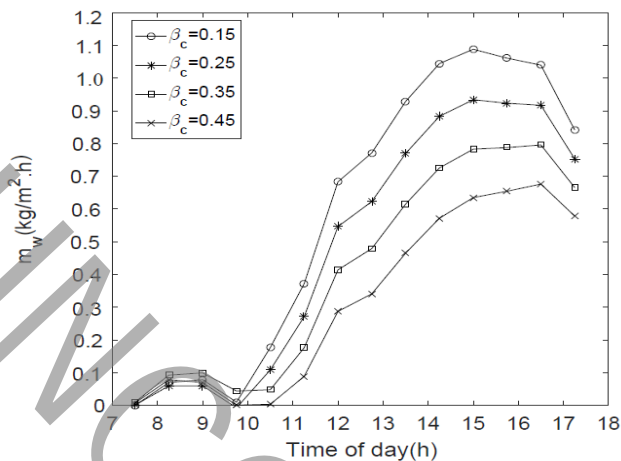


شکل ۴: نمودار میزان کل تولید آب شیرین بر حسب زمان

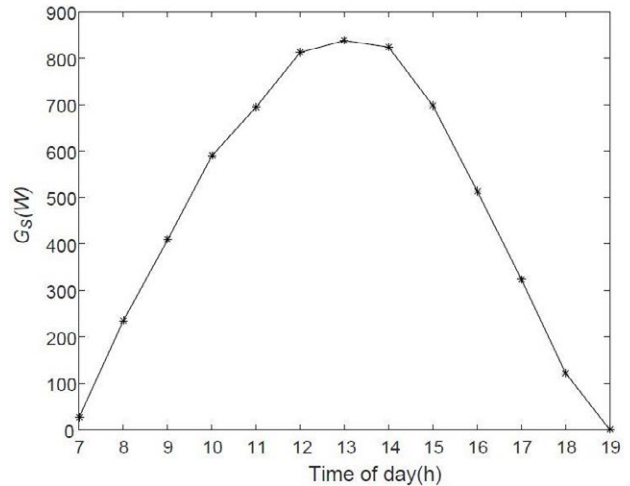
$$Er = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{sim,i} - X_{exp,i}}{X_{exp,i}} \right| \times 100 \quad (33)$$

شکل ۳ مقادیر شبیه سازی شده و آزمایشگاهی دماهای اجزای مختلف آب شیرین کن را بر حسب زمان آزمایش نشان می دهد. مقدار خطای بین داده های مقاله مورد نظر و داده های شبیه سازی شده برای دمای کف حوضچه، دمای آب و دمای شیشه چگالنده به ترتیب ۴/۳۳، ۵/۵۰ و ۶/۴۱ درصد به دست آمده است.

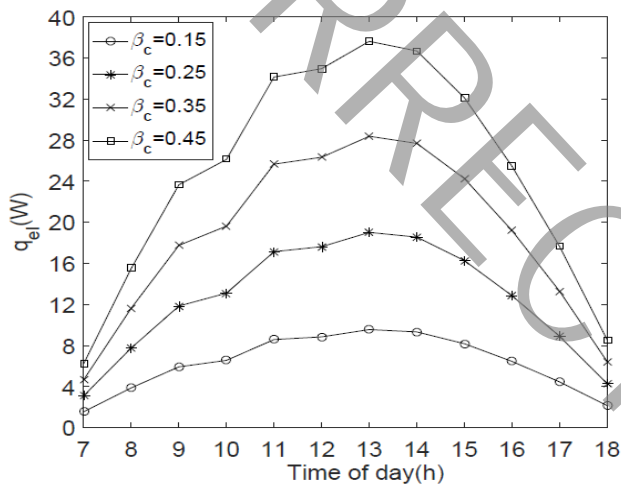
زمانی که داده های تجربی و شبیه سازی کوچک هستند محاسبه خطای نسبی متوسط نمی تواند ملاک مناسبی برای مقایسه داده ها



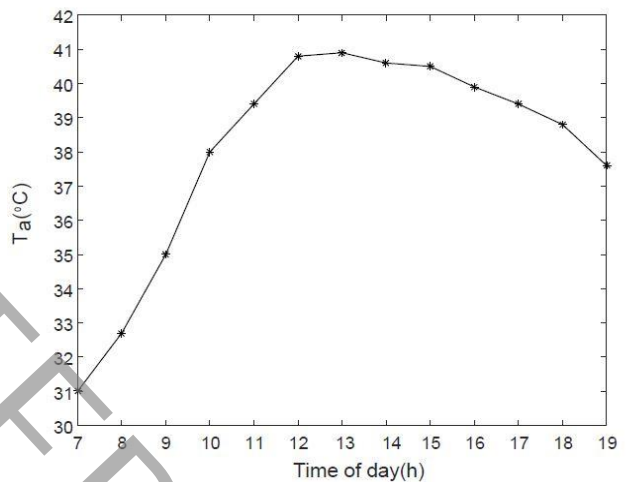
شکل ۸: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید آب شیرین بر حسب زمان با تغییرات درصد پوشش سلول فتوولتائیک



شکل ۶: تغییرات شدت تابش خورشیدی در روز ۲۰ تیر [۲۰]



شکل ۹: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید توان الکتریکی بر حسب زمان



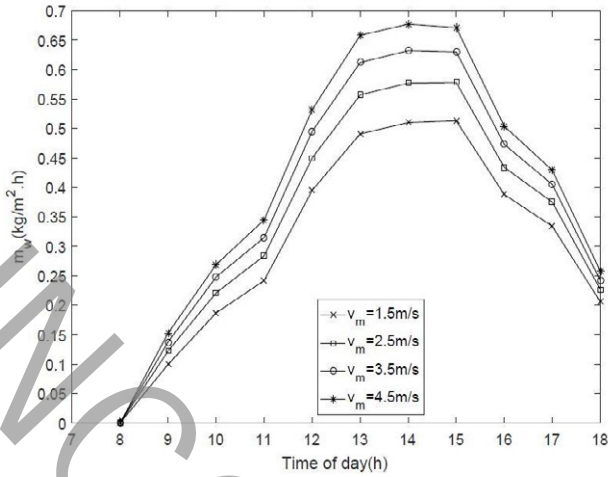
شکل ۷: تغییرات دمای محیط در روز ۲۰ تیر [۲۱]

با توجه به شکل ۸، با افزایش ۱۰ درصدی پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک، میزان تولید آب شیرین ۱۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. چون با افزایش سلول‌های فتوولتائیک میزان تابش خورشیدی رسیده به آب درون حوضچه به دلیل ایجاد سایه کاهش می‌یابد. شکل ۹ میزان تولید انرژی الکتریکی در ۴ مقدار متفاوت درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک را بیان می‌کند. با توجه به شکل با افزایش ۱۰ درصدی پوشش شیشه توسط سلول‌های فتوولتائیک، تولید برق ۴۲ درصد بیشتر می‌شود. افزایش درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک به منزله افزایش تعداد سلول‌ها و به طبع افزایش توان الکتریکی می‌باشد.

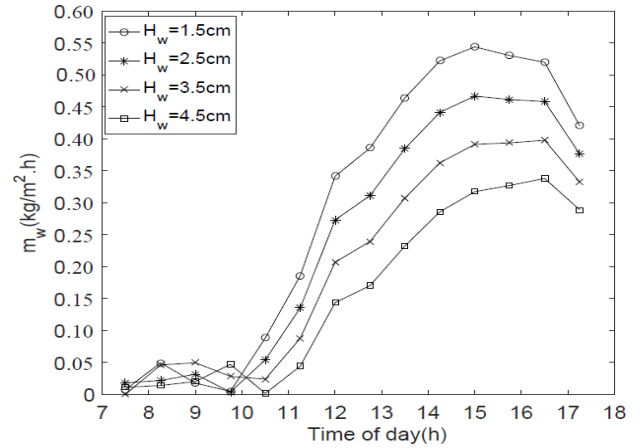
پارامتری در شهر زاهدان و در روز ۲۰ تیر انجام گرفته است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب شدت تابش خورشیدی و دمای محیط را در این روز نشان می‌دهد.

در ابتدا تأثیر تغییر پارامتر درصد پوشش سطح را بر جرم آب تولیدی و توان الکتریکی تولیدی به ازای سایر پارامترهای ثابت بررسی شده است. شکل ۸ میزان تولید آب شیرین را بر حسب زمان در ۴ مقدار متفاوت درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک نشان می‌دهد. این پارامترها به صورت زیر ثابت در نظر گرفته می‌شوند:

$$v_w = 2.5 \text{ m/s}, H_w = 0.040 \text{ m}, A_b = 1.0 \text{ m}^2 \quad (35)$$



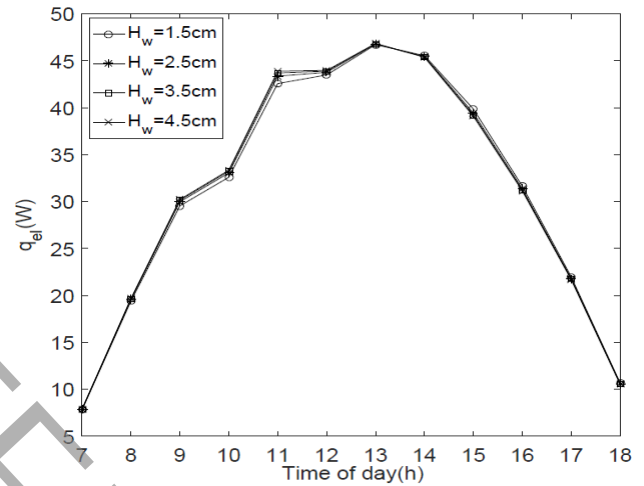
شکل ۱۲: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید آب شیرین بر حسب زمان برای تغییرات سرعت وزش باد



شکل ۱۰: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید آب شیرین بر حسب زمان با تغییرات عمق آب

شکل ۱۰ میزان تولید آب شیرین را بر حسب زمان در ۴ مقدار متفاوت عمق آب شور حوضچه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۰، با افزایش ۱۰ درصدی عمق آب حوضچه مقدار جرم تولیدی آب کاهش ۷ درصد پیدا می‌کند. افزایش ارتفاع آب درون حوضچه به معنی کاهش ضریب عبور آب و کاهش شدت تابش خورشیدی جذب شده توسط صفحه جاذب می‌باشد که این باعث کاهش دمای آب درون حوضچه و در نهایت باعث کاهش تولید آب شیرین می‌شود.



شکل ۱۱: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید انرژی الکتریکی بر حسب زمان برای تغییرات عمق آب

شکل ۱۱ میزان تولید انرژی الکتریکی آب شیرین کن خورشیدی به ازای تغییر عمق آب حوضچه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل عمق آب حوضچه در تولید انرژی الکتریکی تقریباً بی‌تأثیر است.

مقدار مطلوب برای ارتفاع آب درون حوضچه ۰/۱۵ متر می‌باشد. چون کمتر از این مقدار برای سیستم با ابعاد هندسی مورد نظر مطلوب نیست و همچنین با افزایش ارتفاع آب درون حوضچه، جرم آب درون حوضچه افزایش می‌یابد که به معنی کاهش ضریب عبور آب و کاهش شدت تابش خورشیدی جذب شده توسط صفحه جاذب می‌باشد که این باعث کاهش دمای آب درون حوضچه و در نهایت باعث کاهش تولید آب شیرین می‌شود.

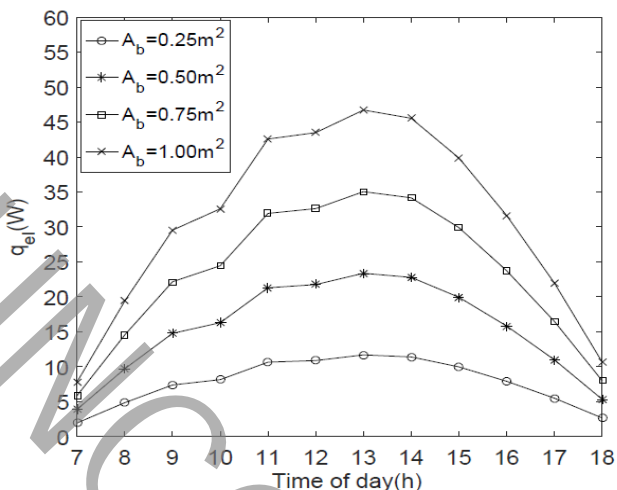
شکل ۱۲ میزان تولید آب شیرین بر حسب زمان در ۴ مقدار متفاوت سرعت وزش باد به ازای پارامترهای ثابت زیر بررسی می‌کند.

مقدار مطلوب برای درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک ۰/۲۵ می‌باشد. زیرا با افزایش این مقدار، تولید آب شیرین به دلیل ایجاد سایه و کاهش جذب شدت تابش خورشیدی توسط آب کاهش می‌یابد و کمتر از این مقدار نیز میزان تولید برق را کاهش می‌دهد که مطلوب نیست.

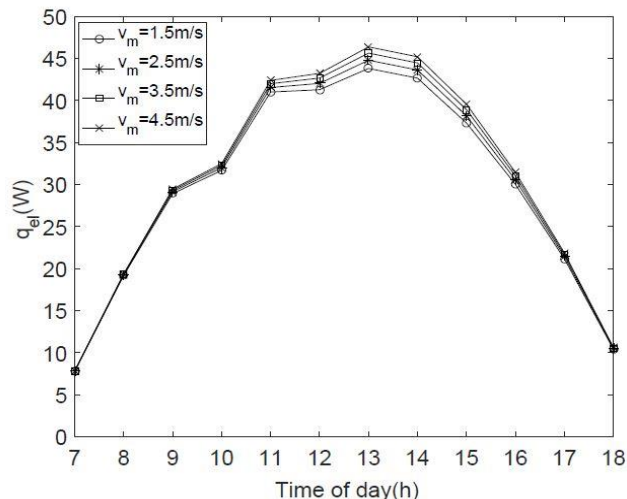
حال تأثیر تغییر پارامتر عمق آب حوضچه بر جرم آب تولیدی و توان الکتریکی تولیدی به ازای سایر پارامترهای ثابت بررسی شده است. این پارامترها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\beta_c = 0.25, H_w = 0.015m, A_b = 1.0m^2 \quad (37)$$

$$v_w = 2.5 m/s, \beta_c = 0.25, A_b = 1.0m^2 \quad (36)$$



شکل ۱۵: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید انرژی الکتریکی بر حسب زمان برای تغییرات سطح جاذب حوضچه



شکل ۱۳: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید انرژی الکتریکی بر حسب زمان برای تغییرات سرعت وزش باد

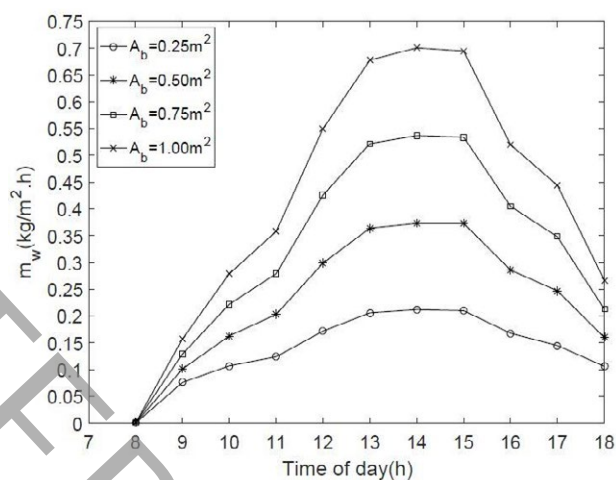
مقدار مطلوب برای سرعت وزش باد $3/5$ متر بر ثانیه است. چون افزایش سرعت باد پس از مقدار مطلوب آن باعث ازدیاد اتلافات جابه‌جایی سیستم می‌شود.

شکل ۱۴ میزان تولید آب شیرین را بر حسب زمان در 4 مقدار متفاوت سطح جاذب حوضچه، به ازای پارامترهای ثابت زیر نشان می‌دهد.

$$v_w = 3.5 \text{ m/s}, \beta_c = 0.25, H_w = 0.015 \text{ m} \quad (38)$$

با توجه به شکل ۱۴، با افزایش 10% درصدی مساحت سطح حوضچه تولید آب شیرین 11% درصد افزایش می‌یابد. افزایش مساحت صفحه جاذب به منزله افزایش شدت تابش خورشیدی جذب شده توسط سطح صفحه جاذب می‌باشد لذا دمای آب درون حوضچه و به دنبال آن نرخ انتقال حرارت تبخیری افزایش می‌یابد که در نهایت باعث افزایش جرم آب تولیدی می‌شود.

شکل ۱۵ میزان تولید انرژی الکتریکی را بر حسب زمان در چهار مقدار متفاوت سطح جاذب حوضچه نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش 10% درصدی مساحت سطح تولید انرژی الکتریکی 8% درصد افزایش می‌یابد. افزایش مساحت سطح کف حوضچه به معنای کاهش ارتفاع آب و افزایش میزان تبخیر است. که این باعث افزایش چگالش بخار آب روی شیشه چگالنده می‌شود. افزایش چگالش بخار آب باعث



شکل ۱۴: مقادیر شبیه‌سازی میزان تولید آب شیرین بر حسب زمان برای تغییرات سطح جاذب حوضچه

با توجه به شکل ۱۲ با افزایش 10% درصدی سرعت وزش باد جرم تولیدی آب 5% درصد افزایش می‌یابد. چون افزایش سرعت وزش باد باعث خنک‌سازی شیشه چگالنده می‌شود.

شکل ۱۳ میزان تولید انرژی الکتریکی را بر حسب زمان در چهار مقدار متفاوت سرعت وزش باد نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش 10% درصدی سرعت وزش باد تولید توان الکتریکی 1% درصد افزایش می‌یابد. زیرا افزایش سرعت باد باعث خنک‌سازی سلول‌های فتوولتائیک می‌شود که این باعث افزایش کارایی سلول‌های فتوولتائیک است.

در نظر گرفته شده است:

$$G_s = 600 \text{ W/m}^2, v_w = 3.5 \text{ m/s}, H_w = 0.015 \text{ m}, A_b = 1.0 \text{ m}^2, T_a = 25^\circ \text{ C} \quad (39)$$

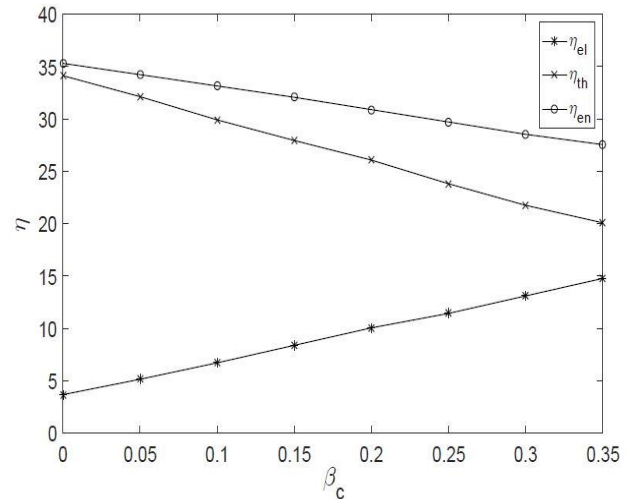
با توجه به شکل ۱۶ با افزایش سلول‌های فتوولتائیک بازدهی الکتریکی افزایش و بازدهی گرمایی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش سلول‌های فتوولتائیک تولید برق افزایش و تولید آب شیرین کاهش می‌یابد و در مجموع بازدهی کلی سیستم کاهش می‌یابد. شکل ۱۷ نمودار تغییرات بازدهی گرمایی، بازدهی الکتریکی و بازدهی کلی سیستم را بر حسب تغییرات عمق آب حوضچه نشان می‌دهد. در این حالت تنها عمق آب حوضچه تغییر می‌کند و برای سایر پارامترها مقدار مطلوب آن‌ها مانند زیر در نظر گرفته شده است:

$$G_s = 600 \text{ W/m}^2, v_w = 3.5 \text{ m/s}, \beta_c = 0.25, A_b = 1.0 \text{ m}^2, T_a = 25^\circ \text{ C} \quad (40)$$

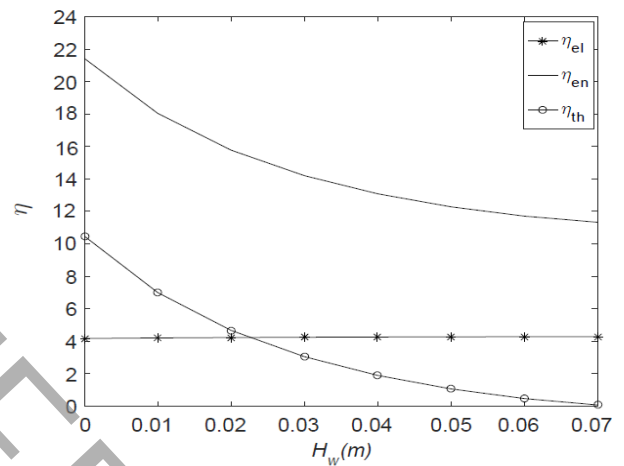
با توجه به شکل ۱۷ با افزایش عمق آب حوضچه، بازدهی الکتریکی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در حالی که بازدهی گرمایی با افزایش عمق آب حوضچه کاهش می‌یابد و نتیجه این که با افزایش عمق آب حوضچه بازدهی کلی سیستم کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- نتایج تحقیق حاضر با نتایج پژوهش‌های گذشته در توافق خوبی می‌باشد.
- ۲- با ۱۰ درصد افزایش سطح پوشش شیشه توسط سلول‌های فتوولتائیک تولید برق و آب شیرین به ترتیب ۴۲ درصد افزایش و ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.
- ۳- با ۱۰ درصد افزایش عمق آب حوضچه میزان جرم تولیدی آب شیرین ۷ درصد کاهش می‌یابد و در تولید انرژی الکتریکی تقریباً بی‌تأثیر است.
- ۴- با ۱۰ درصد افزایش سرعت وزش باد تولید برق و آب شیرین به ترتیب ۱ و ۵ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶: بازدهی سیستم بر حسب درصد پوشش سطح شیشه چگالنده با سلول‌های فتوولتائیک



شکل ۱۷: بازدهی بر حسب تغییرات عمق آب حوضچه

کاهش دمای شیشه و سلول‌های فتوولتائیک شده که خنک‌سازی سلول‌ها باعث افزایش کارایی آن می‌شود. مقدار مطلوب مساحت صفحه جاذب ۱ متر مربع می‌باشد چون با افزایش مساحت صفحه جاذب پس از مقدار مطلوب آن، ضخامت آب شور درون حوضچه کم می‌شود که عملکرد سیستم را مختل می‌کند. شکل ۱۶ نمودار تغییرات بازدهی گرمایی، بازدهی الکتریکی و بازدهی کلی سیستم را بر حسب تغییرات درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک و به ازای پارامترهای مطلوب نشان می‌دهد. در این حالت تنها درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک تغییر می‌کند و برای سایر پارامترها مقدار مطلوب آن‌ها به صورت زیر

۵- با ۱۰ درصد افزایش مساحت سطح کف حوضچه تولید برق و آب شیرین به ترتیب ۱۱ و ۸ درصد افزایش می‌یابد.

۶- با افزایش سلول‌های فتوولتائیک با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، بازدهی الکتریکی و بازدهی گرمایی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. ولی در مجموع بازدهی کلی سیستم کاهش می‌یابد.

۷- با افزایش عمق آب حوضچه با فرض ثابت بودن سایر پارامترها، بازدهی الکتریکی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. در حالی که بازدهی گرمایی کاهش می‌یابد. در نهایت با افزایش عمق آب حوضچه، بازدهی کلی سیستم کاهش می‌یابد.

فهرست نشانه‌ها

علائم انگلیسی

ضریب عبور	τ		
علامت تغییر در یک پارامتر	Δ		
زیرنویس			
محیط	a		
مدار باز	ac		
کف حوضچه	b		
سلول	c		
مطلوب	des		
الکتریکی	el		
انرژی	en		
تبخیر	ev		
گرمای نهان تبخیر آب	fg		
شیشه جگالنده	$g1$		
شیشه جمع کننده	$g2$		
بازتابنده زیر حوضچه	inv		
نقطه ماکزیمم	mp		
مرجع	ref		
مربوط به خورشید	s		
اتصال کوتاه	sc		
مربوط به آب	w		
بالانویس			
تعداد میانگین بازتاب‌ها	N		

A مساحت، m^2

E انرژی، J

\dot{E} نرخ انرژی، W

G_s تابش خورشید بر واحد سطح، W/m

h ضریب انتقال حرارت، $W/K.m^2$

H ارتفاع، m

I جریان الکتریکی، A

m جرم، kg

p توان الکتریکی، W

\dot{q} نرخ انرژی، W

R مقاومت الکتریکی، Ω

T دما، K

t زمان، s

V ولتاژ، V

v سرعت، m/s

علائم یونانی

α ضریب جذب

β درصد پوشش سطح توسط سلول

η بازده (کارایی)

θ زاویه شیب

منابع و مراجع

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. E. Delyannis, Historic background of desalination and renewable energies, Solar Energy, 75(2003) 357-366.
3. G.N. Tiwari, J.M. Thomas, Emran Khan, Optimization of glass cover inclination for maximum Yield in a solar

- 143-148.
13. A.E. Kabeel, Z.M. Omara, F.A. Essa, Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach, *Energy Conversion and Management*, 78(2014)493-498.
 14. A.A. El-Sebaili, M.R.I. Ramadan, S. Aboul-Enein, M. El-Naggar, Effect of fin configuration parameters on single basin solar still performance, *Desalination*, 365(2015) 15-24.
 15. Afrand Masoud, Rasool Kalbasi, Arash Karimipour, Somchai Wongwises, Experimental investigation on a thermal model for a basin solar still with an external reflector, *Energies*, 10(2016) 1- 18.
 16. Z.M. Omara, A.S. Abdullah, T. Dakroryc, Improving the productivity of solar still by using water fan and wind turbine, *Solar Energy*, 147(2017), 181–188.
 17. Z.M Omara, A.E. Kabeel, A.S. Abdullah, A review of solar still performance with reflectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(2017) 638-649.
 18. F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. M. Adeli, An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Applied Energy*, 87(2010) 2328-2339.
 19. J.J. Hermosillo , C.A. Arancibia-Bulnes , C.A. Estrada , Water desalination by Air humidification: Mathematical model and experimental study, *Solar Energy*, 86(2012)1070-1076
 20. M. Nikbakht, Experimental investigation of exergy efficiency of an active basin solar still equipped with PV cells , Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, 2015 (in Persian).
 21. <http://www.sbmet.ir> access on September 2017
 - still, *Heat Recovery Systems & CHP*, 14(1994)447-455.
 4. Suneja, Sangeeta, G.N. Tiwari, Effect of water depth on the performance of an inverted absorber double basin solar still, *Energy Conversion and Management*, 40(1999)1885-1897.
 5. Suneja, Sangeeta, G.N. Tiwari, Parametric study of an inverted absorber triple effect solar still, *Energy Conversion and Management*, 40(1999)1871-1884.
 6. G.N. Tiwari, M.S. Sodha, Performance Evaluation of Solar PV/T System An Experimental Validation, *Solar Energy*, 80(2006)751-759.
 7. A.S. Joshi, A. Tiwari, Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic–thermal (PV/T) air collector, *Renewable Energy*, 32(2007) 2223– 2241.
 8. S. Kumar, A. Tiwari, An Experimental Study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still, *International Journal of Energy Research*, 32(2008) 847-858.
 9. Dev. Rahul, G.N. Tiwari, Characteristic equation of the inverted absorber solar still, *Desalination*, 269(2011) 67-77.
 10. Dev. Rahul, A. Sabah, Abdul-Wahab, G.N. Tiwari, Performance study of the inverted absorber solar still with water depth and total dissolved solid, *Applied Energy*, 88(2011) 252-264.
 11. Abdul-Wahab, A. Sabah, Y. Yousuf, Al-Hatmi, Study of the performance of the inverted solar still integrated with a refrigeration cycle, *Procedia Engineering*, 33(2012) 424-434.
 12. R.R. Shah, A.B. Damor, Performance improvement of double slope solar still using heat absorbing materials, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 3(2013)