

طراحی و بهینه‌سازی یکپارچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده

آرش گچکاران
فاطمه جدا*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
استاد، گروه مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه از یک مدل ریاضی گذرا برای شبیه‌سازی یک آب‌شیرین‌کن حوضچه‌ای منفعل خورشیدی همراه با مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در قسمت پایینی حوضچه استفاده شده است. به منظور تخمین آب شیرین تولیدی در یک سال، از میانگین آب تولیدی نیمه مرداد و بهمن در تهران به عنوان روزهای نمونه تابستانی و زمستانی استفاده شده است. نتایج بهینه سالی به کمک الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که هر چه جرم آب شور در داخل آب‌شیرین‌کن کمتر باشد، مقدار آب شیرین تولیدی بیشتر خواهد بود. یک ماده تغییر فاز دهنده از نوع هیدرات نمک با رسانایی گرمایی و چگالی نسبتاً بالاتری از مابقی نمونه‌ها، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده بهینه انتخاب شد. دمای نقطه ذوب این نوع PCM مقدار ۵۸ درجه سلسیوس است که نزدیک به بیشینه دمای است که آب شور در تابستان به آن می‌رسد. جرم آب، جرم ماده تغییر فاز دهنده و ضخامت شیشه به ترتیب ۲۰، ۳/۱۴ کیلوگرم و ۱۵/۲ میلی‌متر انتخاب می‌شود. مقدار آب شیرین تولیدی سالانه بیشینه در حالت بهینه مقدار ۱۶۳۲ کیلوگرم به ازای هر متر مربع از آب شیرین‌کن به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شیرین‌کن، مواد تغییر فاز دهنده، ذخیره‌سازی گرما، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

Optimization of solar desalination integrated with thermal energy storage using phase-change material

A. Gachkaran
F. Joda

Energy systems and Mechanic Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Energy systems and Mechanic Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Desalination of the brackish water using a passive solar still with a Phase change materials (PCMs) put under the basin liner of the distillation device is dealt with the help of transient mathematical models. To achieve an optimal system, genetic algorithm is used. In order to estimate the desalinated water in a year, the mass of fresh water in two days of midsummer (7 August) and the midwinter (4 February) was calculated as the typical days in summer and winter. It is assumed that the average amount of water produced in these two days will be repeated for all days at the year. The results showed that mass reduction of saline water is lead to Increase of desalinated water mass. A salt hydrate PCM that its thermal conductivity and density were $0.69 \frac{W}{m.K}$ and $1505 \frac{Kg}{m^3}$ respectively was selected as the optimal PCM. This type of PCM had a higher thermal conductivity and density than other PCMs. The melting point of this type of PCM is $58^{\circ}C$, which is close to the maximum temperature that saline water reaches in the summer. According to considered limitations for inputs of genetic algorithms, water mass, PCM mass and thickness of the glass, 20 kg, 3.14 kg and 2.15 mm were selected respectively. The maximum amount of annual produced freshwater In optimal mode obtained 1632 kg per square meter of desalination.

Keywords: Desalination, Heat Storage, PCM, Genetic algorithm, Optimization.

۱- مقدمه

شرایط خشک‌سالی در خاورمیانه و به‌ویژه در کشور ایران منجر به کاهش دسترسی به آب آشامیدنی گردیده است. به نظر می‌رسد این شرایط بحرانی مناطق مذکور را با مشکلات عدیده اقتصادی اجتماعی و ... روبرو خواهند کرد. در این مناطق عموماً آب شیرین به صورت جاری محدود است و غالباً تأمین آب از طریق حفر چاه‌های بسیار عمیق امکان‌پذیر است. این موضوع علاوه بر هزینه‌های گزاف، مسائل بهداشتی و شور بودن آب‌های زیرزمینی را نیز در بر دارد.

دسترسی به روشی ساده و ارزان برای تولید آب شرب، ضروری به نظر می‌رسد. طی این فرایند آب باید از مواد نامحلول، محلول و میکروب‌های مضر تصفیه شود. روش‌های معمول مانند گذراندن از فیلتر شنی فقط مواد نامحلول را جدا می‌کند. همچنین کلرزی و جوشاندن،

فقط میکروب‌های مضر را از بین می‌برند. اما روش تقطیر هر سه عملکرد را باهم انجام می‌دهد.

انرژی خورشیدی نیز می‌تواند به عنوان یک منبع انرژی جهت شیرین‌سازی آب‌های شور و آلوده مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از دستگاه‌هایی که بدین منظور از انرژی خورشیدی استفاده می‌کند، حوضچه تقطیر خورشیدی است. حوضچه‌های تقطیر خورشیدی عملکرد ساده و کارآمدی دارند و از گرمای خورشید برای فرایند تبخیر آب درون محفظه بسته استفاده می‌کند. تقطیر این بخار آب شیرین سازی آب را به همراه خواهد داشت.

تأمین آب آشامیدنی از طریق انتقال آب از شهرهای بزرگ به مناطق محروم مشکلات دیگری همانند هزینه‌های بالا انتقال و احداث شبکه آب‌رسانی دارد. بدین ترتیب برای تأمین آب شیرین برای چنین مناطقی باید علاوه بر اقتصادی بودن آب‌شیرین‌کن هزینه‌های تعمیر و

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f_joda@sbu.ac.ir

نگهداری نیز مدنظر قرار گیرد. سادگی سیستم و قابلیت استفاده آسان برای روستاهای محروم از دیگر مواردی است که برای تأمین آب‌های شیرین از آب‌های شور و یا کم کیفیت باید لحاظ گردد. به نظر می‌رسد تنها سامانه‌ای که بتواند حائز تمامی شرایط فوق باشد سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. استفاده از آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی در مناطق کم جمعیت جنوبی کشور که در آن‌ها آب شور تنها منبع آب موجود بوده و دسترسی اقتصادی یا کافی به انرژی‌هایی غیر از انرژی خورشیدی وجود ندارد، بسیار مناسب است. این دستگاه علاوه بر سادگی عملکرد، هزینه نگهداری بسیار کمی دارد و به‌جز نور خورشید و آب اولیه به منبع انرژی یا مواد دیگری نیاز ندارد.

ایده ساخت آب‌شیرین‌کن خورشیدی در کشور ما به دو دلیل عمده وجود دارد: یکی ساعات آفتابی زیاد و تابش شدید نور خورشید و دوم دسترسی به آب‌های شور دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان. معرفی سامانه‌ای که بتواند با به‌کارگیری این دو پتانسیل، آب شیرین موردنیاز کشاورزی، صنعت و شرب را تأمین نماید، یکی از اهداف ما می‌باشد، تا به کمک آن یکی از مشکلات کمبود آب و انرژی در کشور تا حدودی مرتفع شود.

ورپولز و همکاران رفتار یک سیستم تقطیر خورشیدی را با مخزن ذخیره آب گرم و ثابت نگه‌داشتن دمای آب در سطوح مختلف بررسی کردند. در این سامانه، مخزن ذخیره آب در زیر آب‌شیرین‌کن بوده و گرم کردن آب از طریق یک مبادله کن گرمای پره دار صورت گرفته و منجر به افزایش دمای آب مخزن می‌شد. در واقع مخزن ذخیره آب گرم به‌عنوان کلکتور گرما محسوب شده و آب‌شیرین‌کن خورشیدی فقط نقش واحد تقطیری را دارد [۱].

ولموروگان و همکارانش در سال ۲۰۰۸ به‌منظور افزایش تولید این نوع از آب‌شیرین‌کن خورشیدی بررسی‌های انجام دادند. در این کار، به‌منظور افزایش تبخیر آب‌شیرین‌کن، پره‌ها در آب‌شیرین‌کن مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین نرخ تولید سرعت یافت و همچنین، برای افزایش بیشتر اسفنج استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی با نوع معمول حوضچه و حوضچه‌ای که در آن فتیله استفاده شده است، مقایسه شد. در این مطالعه، معادلات تعادل انرژی حاکم به‌صورت تحلیلی حل و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. آن‌ها دریافتند که در زمانی که فتیله در آب‌شیرین‌کن استفاده شود، تولید ۲۹٫۶ درصد افزایش می‌یابد و زمانی که از اسفنج استفاده شده بود تولید ۱۵٫۳ درصد افزایش یافت و در حالتی که از پره‌ها استفاده شده بود تولید ۴۵٫۵ درصد افزایش یافت. بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج تئوری تطبیق خوبی به دست آمده بود [۲].

آقای ابول عنین و همکاران برای بهبود تولید روزانه در آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی مطالعاتی انجام دادند. مطالعات آن‌ها بر روی یکپارچه‌سازی یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی با پوشش شیب‌دار با برکه خورشیدی در دماهای نسبتاً بالا بوده است. معادلات انرژی مربوط به عناصر مختلف سامانه نوشته و حل شده است. برنامه‌های کامپیوتری مناسب برای بهینه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد گرمایی سامانه در نظر گرفته شد. محاسبات برای یک روز تابستانی و زمستانی در تانثا (عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی در مصر) برای ضخامت‌های مختلف و دبی متفاوت به‌منظور بررسی تأثیرات پارامترها بر روی میزان تولید روزانه انجام شد. برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده، مقایسه‌ای

بین مقادیر محاسبه شده و نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌ها انجام شده است. تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده وجود داشت. اجرای مدل در تمام طول سال همراه با و بدون برکه خورشیدی نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر بهینه ضخامت جریان آب و دبی جرمی برای مدل همراه با برکه خورشیدی به ترتیب 0.009 kg/s و 0.3 m به دست آمد. مقدار متوسط سالانه تولید روزانه و راندمان، همراه با برکه خورشیدی بالاتر از حالت بدون برکه خورشیدی و به ترتیب ۵۲٫۳۶ درصد و ۴۳٫۸ درصد به دست آمد [۳].

سبائی و همکاران سامانه تقطیر خورشیدی تک مخزن را به همراه شن در کف مخزن به‌عنوان ماده جاذب انرژی بکار بردند. بخشی از گرمای جذب شده توسط آب، با انجام انتقال گرمای رسانشی به شن زیرین انتقال می‌یابد. افزایش ۲۳٫۸٪ در میزان تولید روزانه نسبت به حالت نبود شن به‌عنوان ماده ذخیره کننده گرما محسوس مشاهده گردید [۴].

عبدالله و همکاران از سه ماده جاذب اسفنج سیمی فلزی پوشش‌دار، بدون پوشش و سنگ‌های آتش‌فشانی در سه سیستم تقطیر خورشیدی مختلف استفاده کرده و میزان آب‌دهی را با حالت غیر فعال مقایسه کردند. خواص تأثیرگذار اسفنج‌ها از قبیل قابلیت جذب و نفوذپذیری، استفاده از آن‌ها را به‌عنوان ماده جاذب انرژی در سامانه‌های تقطیر خورشیدی برجسته می‌سازد. میزان آب‌دهی در شب با به‌کارگیری اسفنج سیمی فلزی پوشش‌دار به میزان ۲۸ درصد، در حالت بدون پوشش ۴۳ درصد و با به‌کارگیری سنگ‌های آتش‌فشانی به میزان ۶۰ درصد افزایش یافتند [۵].

اطلاعات بیشتر در مورد پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تولید سامانه‌های تقطیر خورشیدی توسط ولمرگان و همکارش [۶] ارائه شد. تحقیقات دیگری در زمینه این دستگاه‌ها انجام شده است، از جمله این موارد می‌توان به استفاده از خنک‌کننده [۸،۷] یا منعکس‌کننده [۹]، اضافه کردن زغال یا رنگ‌دانه به آب ورودی [۱۰،۱۱]، تقلیل فشار دستگاه [۱۳،۱۲]، به جریان انداختن آب بر روی سطح مایع کننده [۱۴] و به جریان انداختن هوای درون دستگاه [۱۵] اشاره نمود. کابیل و همکاران [۱۶] روش‌های مورد استفاده برای افزایش راندمان سامانه‌های تقطیر خورشیدی چند طبقه را مورد مقایسه قرار دادند.

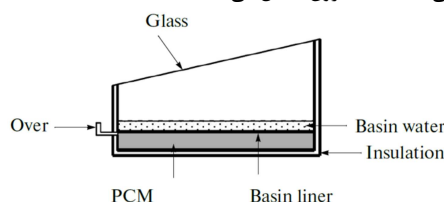
الانگو و همکاران مروری جامع بر مدل‌سازی گرمایی در سامانه‌های مختلف تقطیر خورشیدی که در طی سال‌های مختلف به‌منظور بهبود عملکرد این سامانه‌ها پیشنهاد شده بود، انجام دادند. آن‌ها یافتند که برای انتخاب یک پیکربندی مطلوب برای این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها می‌بایست پارامترهایی نظیر اقتصاد، مواد موجود، شرایط آب و هوای محلی و کیفیت آب مورد استفاده در نظر گرفته شود. همچنین آن‌ها یافتند مدل ارائه شده توسط کومار و تیواری برای تخمین ضریب انتقال گرمای جابجایی در داخل آب‌شیرین‌کن‌های فعال خورشیدی نسبت به سایر مدل‌ها معتبرتر است [۱۷].

اهداف این مقاله شبیه سازی یک آب شیرین کن حوضچه ای همراه با مواد تغییر فازدهنده در طول شبانه روز بیه کمک یک مدل ریاضی و یافتن مقادیر بهینه برای طراحی این نوع آب شیرین کن در نظر گرفته شده است. این مقادیر شامل ضخامت پوشش شیشه ای، جرم آب شور داخل حوضچه، جرم ماده تغییر فازدهنده و همچنین نوع ماده تغییر فاز دهنده در این نوع آب شیرین کن خورشیدی می‌باشد،

به طوریکه این آب شیرین کن به مدت یک سال در شرایط آب و هوایی تهران به کار گرفته شود. به منظور این بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. انتخاب مقادیر بهینه در طراحی، بیشینه شدن مقدار آب شیرین سالانه تولیدی را در پی خواهد داشت. استفاده از این الگوریتم بهینه سازی و یافتن مقادیر بهینه نوآوری مد نظر در این مقاله می باشد.

۲- تشریح سامانه

یک دستگاه تقطیر خورشیدی از نوع حوضچه‌ای یک سامانه برای به دست آوردن آب شرب از آب شور و آلوده با استفاده از انرژی خورشیدی است. یک نمونه از حوضچه خورشیدی همراه با مواد تغییر فاز دهنده یا PCM در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه شامل یک جاذب سیاه است که روی آن آب شور قرار دارد و سقف این دستگاه دارای یک پوشش شیشه‌ای شیب‌دار می باشد. ظرف آبی به منظور جمع‌آوری آب شیرین تقطیر شده در پایین لبه پوشش شیشه‌ای نصب شده است. آبی که در سطح داخلی پوشش شیشه‌ای تقطیر شده است به دلیل گرانش به داخل ظرف آب شیرین می‌ریزد. در آخر این آب خالص به عنوان محصول از این سامانه برداشت می‌شود. انرژی خورشیدی که از پوشش شیشه‌ای گذشته و در آب شور و سطح جاذب، جذب می‌شود موجب گرمایش آب داخل حوضچه خواهد شد. بخشی دیگر این انرژی جذب شده به صورت‌های تابشی و جابجایی و تبخیری به پوشش شیشه‌ای می‌رسد همچنین بخشی از انرژی جذب شده در جاذب از سمت پایین به PCM می‌رسد. ذخیره ساز در سامانه مورد نظر همان PCM می‌باشد که در طول روز در فرآیند شارژ خود با دریافت انرژی از جاذب از حالت جامد به مایع تغییر فاز می‌دهد و در طول شب و در فرآیند تخلیه، انتقال گرما از PCM به جاذب موجب تغییر فاز این ماده از مایع به جامد خواهد شد. پوشش شیشه‌ای به‌طور قابل ملاحظه‌ای تابش خورشیدی را از خود عبور می‌دهد و در مقابل تابش مادون قرمز، مانند جسم مات و کدر عمل می‌کند. این پوشش شیشه‌ای به عنوان چگالنده در داخل حوضچه تقطیر نیز استفاده می‌شود. پوشش شیشه‌ای گرما را به صورت تابشی به آسمان و به صورت جابجایی به محیط بیرون انتقال می‌دهد.



شکل ۱- یک حوضچه تقطیر خورشیدی با پوشش شیشه‌ای شیب‌دار همراه با مواد تغییر فاز دهنده [۱۸]

۳- تحلیل ریاضی و گرمایی

زمانی که موازنه انرژی در هریک از اجزای آب‌شیرین‌کن نوشته می‌شود فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۹]:
(۱) در سامانه، بخار پر فشار موجود است و هیچ‌گونه نشتی با محیط

بیرون ندارد.

(۲) اتلافات گرما از اطراف آب‌شیرین‌کن در نظر گرفته نشده است.

(۳) آب درون حوضچه دارای ضخامت ثابت و بی‌حرکت در نظر گرفته شده است.

(۴) انتقال گرمای غالب در PCM از نوع رسانش می‌باشد. این فرض قابل توجیه است زیرا PCM توسط جاذب از بالا گرم می‌شود و جریان‌های جابجایی آزاد در داخل PCM وجود ندارد.

(۵) PCM اتصال بسیار خوبی با جاذب دارد در نتیجه می‌توان از مقاومت تماسی بین این دو صرف نظر کرد.

(۶) گرادین دما در ضخامت PCM وجود ندارد و T_{pcm} دمای متوسط PCM می‌باشد. این فرض در ضخامت‌های پایین PCM توجیه پذیر است.

در نتیجه موازنه انرژی در هریک از اجزای آب‌شیرین‌کن به صورت زیر خواهد بود.

۳-۱- سطح خارجی پوشش شیشه‌ای

$$\frac{m_g c_{p_g}}{2A_g} \frac{dT_{go}}{dt} = \frac{\alpha_g I(t)}{2} + \left(\frac{k_g}{e_g}\right)(T_{gi} - T_{go}) - q_{cga} - q_{rgs} \quad (1)$$

که در آن q_{rgs} و q_{cga} به ترتیب انتقال گرمای بین سطح خارجی شیشه با محیط و انتقال گرمای تابشی بین سطح خارجی شیشه و آسمان می‌باشد

$$q_{cga} = h_{cga}(T_{go} - T_a) \quad (2)$$

و h_{cga} ضریب انتقال گرمای جابجایی بین سطح خارجی شیشه و محیط است و از رابطه وات موف قابل محاسبه می‌باشد [۲۰].

$$h_{cga} = 2.8 + 3v_{wind} \quad (3)$$

که در آن v_{wind} متوسط سرعت باد است.

$$q_{rgs} = h_{rgs}(T_{go} - T_s) \quad (4)$$

و h_{rgs} به ترتیب ضریب انتقال گرمای بین سطح خارجی شیشه با محیط و ضریب انتقال گرمای تابشی بین سطح خارجی شیشه و آسمان می‌باشد

۳-۲- سطح داخلی پوشش شیشه‌ای

$$\frac{m_g c_{p_g}}{2A_g} \frac{dT_{gi}}{dt} = q_{rwg} + q_{cwg} + q_{ewg} + \frac{\alpha_g I(t)}{2} - \left(\frac{k_g}{e_g}\right)(T_{gi} - T_{go}) \quad (5)$$

که در آن

q_{rwg} انتقال گرمای تابشی بین آب و سطح داخلی شیشه است

q_{cwg} انتقال گرمای جابجایی بین آب و سطح داخلی شیشه است

q_{ewg} انتقال گرمای تبخیری بین آب و سطح داخلی شیشه است

$$q_{rwg} = h_{rwg}(T_w - T_{gi}) \quad (6)$$

$$q_{cwg} = h_{cwg}(T_w - T_{gi}) \quad (7)$$

$$q_{ewg} = h_{ewg}(T_w - T_{gi}) \quad (8)$$

که در آن

h_{rwg} ضریب انتقال گرمای تابشی بین آب و سطح داخلی شیشه است
 h_{cwg} ضریب انتقال گرمای جابجایی بین آب و سطح داخلی شیشه است
 h_{ewg} ضریب انتقال گرمای تبخیری بین آب و سطح داخلی شیشه است

۳-۳- آب درون حوضچه

$$\frac{m_w c_{p,w}}{A_w} \frac{dT_w}{dt} = \tau_g \alpha_w I(t) + q_{cbw} - q_{rwg} - q_{cwg} - q_{ewg} \quad (9)$$

که در آن

q_{cbw} انتقال گرمای جابجایی بین آب و سطح جاذب است

$$q_{cbw} = h_{cbw} (T_b - T_w) \quad (10)$$

۳-۴- جاذب

$$\frac{m_b c_{p,b}}{A_b} \frac{dT_b}{dt} = \tau_g \tau_w \alpha_b I(t) - q_{cbw} + q_{cond,b-pcm} \quad (11)$$

که در آن

$q_{cond,b-pcm}$ انتقال گرمای رسانشی بین جاذب و PCM است

حرارت

$$q_{cond,b-pcm} = k_{pcm} \frac{dT}{dx} = k_{pcm} \frac{T_b - T_{pcm}}{e_{pcm}} \quad (12)$$

$$= h_{cond,b-pcm} (T_b - T_{pcm})$$

$h_{cond,b-pcm}$ انتقال گرمای رسانشی بین جاذب و PCM است

۳-۵- مواد تغییر فاز دهنده PCM

$$\frac{m_{pcm} c_{p,pcm}}{A_{pcm}} \frac{dT_{pcm}}{dt} = q_{cond,b-pcm} - q_b \quad (13)$$

که در آن

q_b انتقال گرمای رسانشی بین PCM و محیط بیرون است.

$$U_b = \frac{k_i}{e_i} \quad (14)$$

$$q_b = U_b (T_{pcm} - T_a) \quad (15)$$

رابطه (۱۳) برای حالتی نوشته شده است که PCM نسبت به زمان تغییر دما داشته باشد. طبیعتاً این امر در زمانی که PCM در فاز جامد و مایع است کاملاً صدق می‌کند به‌منظور استفاده از همین رابطه برای فرآیند تغییر فاز از روش ظرفیت گرمایی معادل استفاده شد. در این روش تغییر دما در فرآیند تغییر فاز ناچیز در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{if } T_{pcm} < T_m \rightarrow C_p &= C_{p,s} \\ \text{if } T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \Delta T \rightarrow C_p &= \frac{C_{p,s} + C_{p,l}}{2} + \frac{L_f}{\Delta T} \\ \text{if } T_{pcm} > T_m \rightarrow C_p &= C_{p,l} \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن ΔT تغییر دمایی است که PCM در طول فرآیند تغییر فاز تجربه می‌کند. برای حالی که تغییر فاز در PCM همراه با تغییر دما نیست ΔT کمترین مقدار ممکن در نظر گرفته می‌شود.

۴- روش حل عددی

به‌منظور حل عددی هم زمان معادلات دیفرانسیلی حاکم بر سامانه (روابط (۱) تا (۱۶)) برای خارج کردن معادلات از حالت دیفرانسیلی مقادیر مشتق به‌صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{new} - T_{old}}{\Delta t} \quad (17)$$

سپس معادلات به نحوی مرتب‌سازی شده است که T_{new} به تنهایی در یک طرف معادلات و بقیه متغیرها در طرف دیگر قرار گیرند.

$$T_{ge} = \frac{h_1 T_s + h_{cga} T_a + u_1 T_{gi} + \frac{P_g}{2} + \frac{x_1}{2\Delta t} T_{ge,old}}{h_1 + h_{cga} + u_1 + \frac{x_1}{2\Delta t}} \quad (18)$$

$$T_{gi} = \frac{h_6 T_w + u_1 T_{ge} + \frac{P_g}{2} + \frac{x_1}{2\Delta t} T_{gi,old}}{h_6 + u_1 + \frac{x_1}{2\Delta t}} \quad (19)$$

$$T_w = \frac{h_6 T_{gi} + h_7 T_b + P_w + \frac{x_2}{\Delta t} T_{w,old}}{h_6 + h_7 + \frac{x_2}{\Delta t}} \quad (20)$$

$$T_b = \frac{h_7 T_w + h_{cond,b-pcm} T_{pcm} + P_b + \frac{x_3}{\Delta t} T_{b,old}}{h_7 + h_{cond,b-pcm} + \frac{x_3}{\Delta t}} \quad (21)$$

$$T_{pcm} = \frac{h_{cond,b-pcm} T_b + U_b T_a + \frac{x_4}{\Delta t} T_{pcm,old}}{U_b + h_{cond,b-pcm} + \frac{x_4}{\Delta t}} \quad (22)$$

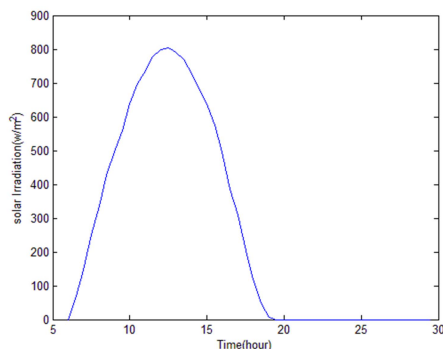
که در آن h_1 ضریب انتقال حرارت تابشی بین شیشه و آسمان است. u_1 ضریب انتقال حرارت هدایتی در داخل پوشش شیشه است. h_6 ضریب انتقال حرارت داخلی سیستم یا مجموع ضرایب انتقال تابشی، جابجایی و تبخیری بین آب و پوشش شیشه‌ای است. h_7 ضریب انتقال گرمای جابجایی بین جاذب و آب شور می‌باشد. مقادیر P شدت تابش رسیده بر هر یک از اجزای آب‌شیرین‌کن می‌باشد. مقادیر x نیز یک پارامتر متناظر با ظرفیت گرمایی ویژه آب شیرین‌کن است.

در گام بعدی نقطه شروع یا شرایط اولیه برای حل مسئله مشخص می‌شود، این نقطه یک گام قبل از طلوع آفتاب در نظر گرفته شده است. در ابتدا تمامی دماهای مجهول برابر با دمای محیط فرض می‌شود، سپس با داشتن این دماها با استفاده از روابط موجود در پیوست، تمامی ضرایب انتقال حرارت برای نقطه شروع محاسبه می‌شود. برای حل مسئله در بازه زمانی بعدی با استفاده از ضرایب انتقال گرمایی که در مرحله اول بدست آمده، دماهای اجزا با استفاده از معادلات تعادل (۱) تا (۱۶) محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از این مقادیر مجدداً با استفاده از روابط پیوست، ضرایب انتقال گرمای جدیدی بدست می‌آید. با این ضرایب جدید و روابط به دست آمده از تعادل (۱) تا (۱۶) مجدداً دماهای اجزای آب‌شیرین‌کن بدست می‌آید. همین روند چندین بار ادامه داده می‌شود تا ضرایب انتقال گرما و دماها همگرا شوند. بدین صورت حالت سیستم در بازه زمانی بعدی کاملاً مشخص خواهد شد. همین روند در یک حلقه مجزا برای تمامی بازه‌های دمایی تکرار می‌شود تا تمامی متغیرها در تمامی زمان‌ها بدست آیند.

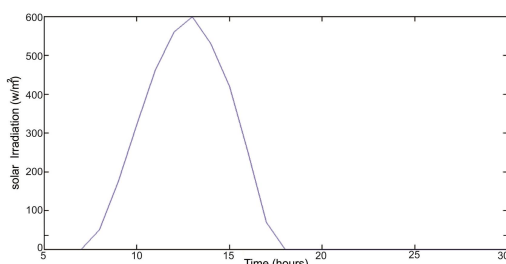
۵- نتایج شبیه سازی

۵-۱- شدت تابش اندازه گیری شده و دمای هوای تهران

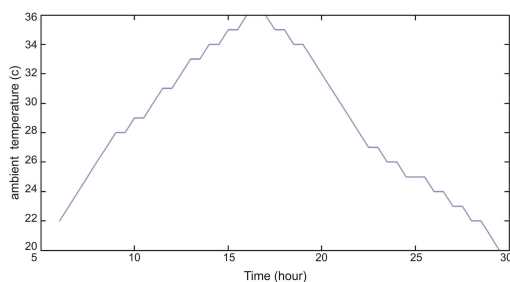
در ابتدا برای شبیه سازی آب شیرین کن خورشیدی به داده های هوا شناسی نیاز است. این داده ها که در فصل قبل برای تهران آمده شامل دمای هوای و تابش خورشید در سطح افقی می باشد. این داده ها برای دو روز مجزای نمونه تابستان و زمستان اندازه گیری شده است. روز نمونه تابستان ۱۵ مرداد ماه و روز نمونه زمستان ۱۵ بهمن ماه انتخاب شده است. دمای هوا و تابش خورشیدی در تابستان در هر نیم ساعت اندازه گیری شده است که در شکل ۲ و شکل ۳ قابل ملاحظه می باشند



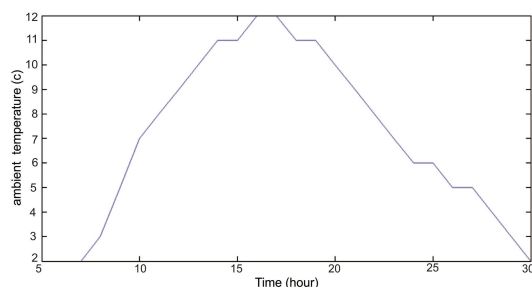
شکل ۲- الف) شدت تابش خورشید در ۱۵ مرداد در تهران



شکل ۲- ب) شدت تابش خورشید در ۱۵ بهمن در تهران



شکل ۳- الف) دمای هوای تهران در ۱۵ مرداد



شکل ۳- ب) دمای هوای تهران در ۱۵ بهمن

۶- تعریف متغیرهای آب شیرین کن بدون PCM

در آب شیرین کن مورد نظر پارامترهایی وجود دارد که همواره مقداری ثابت است. این پارامترها، ضرایب عبور و جذب و نشر اجزای آب شیرین کن می باشد که در جدول زیر آمده است [۱۹].

به منظور این شبیه سازی می بایست متغیرهای خاصی را برای آب شیرین کن در نظر گرفت. مساحت آب شیرین کن ۱ مترمربع در نظر گرفته می شود. زاویه پوشش شیشه ای ۱۵ درجه خواهد بود و جرم آب درون آب شیرین کن ۵۰ کیلوگرم است. سرعت متوسط وزش باد نیز ۱ m/s در نظر گرفته شده است. ۲۰ کیلوگرم پارافین واکس به عنوان PCM انتخاب شد. خصوصیات فیزیکی این PCM در پیوست آمده است. سایر متغیرها در آب شیرین کن و شرایط آب و هوایی در جدول ۱ و ۲ و شکل ۲ و ۳ آمده است.

جدول ۱- مقادیر ثابت در آب شیرین کن

پارامتر	مقدار
ε_g	۰٫۸۸
ε_w	۰٫۹۵
τ_g	۰٫۹
τ_w	۰٫۹۵
α_p	۰٫۹
α_w	۰٫۰۵
α_g	۰٫۰۵

جدول ۲- متغیرهای آب شیرین کن شبیه سازی شده

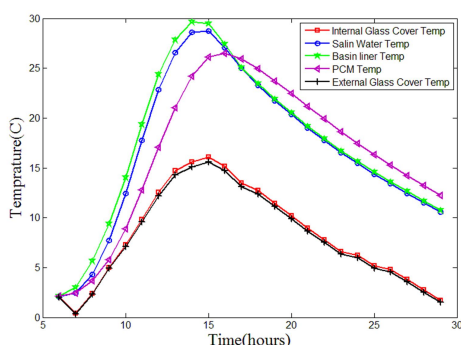
جرم m (kg)	چگالی ρ (kg/m ³)	رسانایی گرمایی K (w/m K)	گرمای ویژه Cp (J/kg K)	
۷٫۶۸	۲۵۳۰	۱٫۰۲	۸۰۰	پوشش شیشه ای
۷۰	۱۰۲۲٫۶۱	۰٫۷۶	۴۱۹۰	آب
۵٫۴	۲۷۰۰	۲۰٫۴	۸۹۶	جاذب (آلومینیوم)
۶۰	۲۰۰	۰٫۰۴	۶۷۰	عایق حرارتی (پشم شیشه)

۷- دمای اجزای مختلف آب شیرین کن

۷-۱- دمای اجزای مختلف آب شیرین کن در تابستان

حال می توان دمای تک تک اجزای آب شیرین کن را در طول روز با وجود PCM در بازه های نیم ساعته شبیه سازی نمود. شکل ۴ نشان دهنده دمای اجزای آب شیرین کن در طول شبانه روز در تهران و در

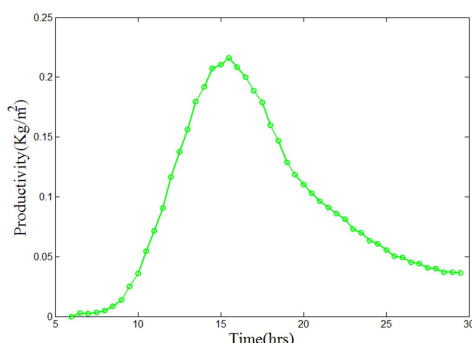
تأخیر بیشتری در PCM پدیدار می‌شود.



شکل ۵- دمای اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن با PCM در زمستان

۸- آب شیرین تولیدی

حال برای آب‌شیرین‌کن تحت شرایط آب و هوایی تابستان می‌توان با داشتن تمامی دماها در تمامی ساعت‌ها، نرخ آب تولیدی در بازه‌های نیم ساعته را محاسبه نمود که در شکل ۶ آمده است.

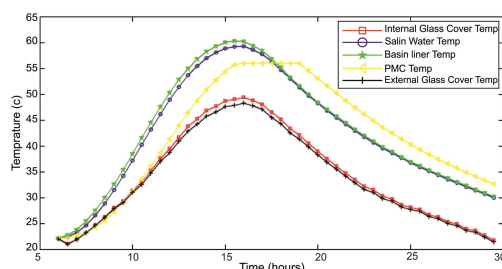


شکل ۶- نرخ آب شیرین تولیدی

بالاترین میزان آب تولیدی در ساعت ۱۵:۰۰ تا ۱۵:۳۰ می‌باشد و مقدار آن $0.2167 \frac{Kg}{m^2}$ است. از محدوده این ساعت تا ساعت ۱۹:۰۰ میزان آب تولیدی با شیب تقریباً تندی کاهش پیدا می‌کند. بعد از ساعت ۱۹:۰۰ که زمان غروب آفتاب می‌باشد و تابش خورشیدی وجود ندارد و PCM در حال گرم کردن جاذب است، سرعت کاهش تولید آب شیرین کمتر می‌شود و این نرخ شکل یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد. همان‌طور که قبلاً هم گفته شد دمای PCM و آب شور در انتها به ترتیب به دمای ۳۲/۵۵ و ۳۰/۲ درجه سلسیوس می‌رسد که نه تنها از دمای اولیه آن‌ها بالاتر است. بنابراین دمای آب و PCM در شروع روز دوم به مراتب بالاتر از روز اول است و این موضوع بر روی آب شیرین تولیدی سامانه در روزهای بعدی تأثیر خواهد گذاشت. با فرض این که همین شرایط آب و هوایی برای سه روز متوالی تکرار شود دمای تک تک اجزا و میزان آب شیرین تولیدی در شکل ۷ در بازه‌های نیم ساعته توسط نرم افزار رسم شده است.

اواسط تابستان می‌باشد. این نتایج با نتایجی که آقای عمر انصاری و همکاران [۲۱] برای شرایطی نسبتاً مشابه در مراکش بدست آورده‌اند، تطابق قابل قبولی دارد. در این پیکربندی حداکثر دمایی که آب به آن می‌رسد ۵۹/۲۵ درجه و در ساعت ۱۶:۰۰ می‌باشد. افزایش دما یا شارژ PCM در طول روز انجام می‌شود. مقدار کمینه دمای که در انتهای ۲۴ ساعت PCM و آب شور به ترتیب به آن می‌رسند ۳۲/۵۵ و ۳۰/۲ درجه سلسیوس است. مدت زمانی که این آب‌شیرین‌کن کار می‌کند را می‌توان به دو بخش قبل از ساعت ۱۷:۳۰ و بعد از ساعت ۱۷:۳۰ تقسیم کرد. بین ساعت ۶:۰۰ تا ۱۷:۳۰ همواره دمای PCM کمتر از جاذب می‌باشد. این بدان معناست که جهت انتقال حرارت از جاذب به سمت PCM می‌باشد. در این دوره انرژی که به واسطه تابش خورشید به جاذب می‌رسد به دو بخش تقسیم می‌شود. بخشی به آب شور منتقل می‌شود و سبب افزایش دمای آب می‌شود و بخشی نیز به PCM وارد می‌شود، به این بازه زمانی دوره شارژ گفته می‌شود.

در ساعت ۱۷:۳۰ در حالی که PCM در دمای ثابت ۵۶ درجه تغییر فاز می‌دهد، دمای جاذب نیز حدوداً برابر با PCM می‌شود. بعد از ساعت ۱۷:۳۰ دقیقه دیده می‌شود که PCM به دمایی بالاتر از دمای جاذب می‌رسد. در این دوره جهت انتقال حرارت معکوس شده و گرما از PCM به سمت جاذب خواهد بود. در این دوره این جاذب است که توسط PCM گرم می‌شود، به این دوره زمانی تخلیه یا دشارژ گفته می‌شود.



شکل ۴- دمای اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن در تابستان

۷-۲- دمای اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن در زمستان

می‌توان همین آب‌شیرین‌کن را در آب و هوایی که در زمستان (۱۵ بهمن) اندازه‌گیری شده است، شبیه‌سازی نمود و دمای اجزای آن را در طول شبانه‌روز محاسبه کرد، خروجی در شکل ۵ آمده است. در شکل ۵ دمای PCM با نقاط مثلثی مشخص است. حداکثر دمایی که PCM به آن می‌رسد، در ساعت ۱۶:۰۰ و به مقدار ۲۶/۵۳ می‌باشد. این درحالی است که دمای ذوب PCM ۵۶ درجه سلسیوس است. در نتیجه در این روز زمستانی PCM به دمای ذوب خود نرسیده و تغییر فاز نمی‌دهد و کلاً در هر دو فرایند شارژ و تخلیه در فاز جامد خواهد ماند. حداکثر دمایی که آب در طول شبانه‌روز به آن می‌رسد در ساعت ۱۵:۰۰ و مقدار ۲۸/۲۳ درجه سلسیوس می‌باشد. ساعتی که آب PCM دارای دمای حداکثر در طول شبانه‌روز هستند به ترتیب ۱۵:۰۰ و ۱۶:۰۰ می‌باشد که یک ساعت با یکدیگر اختلاف دارند. از آنجا که هم آب شور و هم PCM توسط جاذب گرم شده و افزایش دما می‌دهند، دمای آن‌ها متأثر از جاذب خواهد بود اما چون ضریب انتقال حرارت بین جاذب و آب داخل حوضچه به مراتب بالاتر از ضریب انتقال حرارت بین جاذب و PCM است، تأثیر تغییرات دمایی در جاذب با

۹- بهینه‌سازی

به‌منظور بهینه‌سازی سامانه از الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. ورودی‌های الگوریتم ژنتیک چهار متغیر نوع PCM، جرم PCM، جرم آب شور و ضخامت پوشش شیشه‌ای در نظر گرفته شد و هدف الگوریتم ژنتیک هم جرم آب شیرین تولیدی سالانه انتخاب گردید.

برای برآورد عملکرد این آب‌شیرین‌کن در طول یک سال، دو روز تابستانی و زمستانی (۱۵ مرداد و ۱۵ بهمن) که در آن‌ها شدت تابش اندازه‌گیری شده به‌عنوان روزهای نمونه در سال انتخاب شده‌اند. از آنجا که برای پایداری سامانه تقریباً سه روز زمان نیاز است، شبیه‌سازی سه روز متوالی در تابستان با شرایط آب‌وهوایی مشابه و سه روز متوالی در زمستان انجام گرفت و میانگین آب تولیدی در این شش روز به‌عنوان حالتی انتخاب شد که فرض می‌شود در کل ۳۶۵ روز سال تکرار شود. بنابراین جرم آب تولیدی سالانه سامانه به‌صورت زیر خواهد بود.

$$M_{total} = \frac{M_{sum} + M_{win}}{2 \times day} \times 365 \quad (24-4)$$

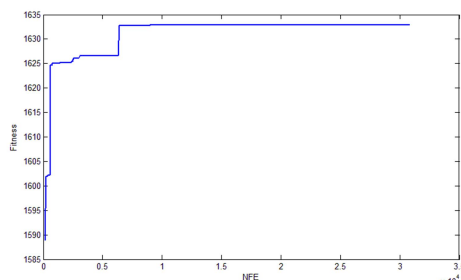
که در آن M_{sum} کل آب تولیدی در روزهای متوالی در تابستان و M_{win} کل آب تولیدی در روزهای متوالی در زمستان می‌باشد و day نیز تعداد روزهای متوالی است که در طی آن شبیه‌سازی انجام می‌شود.

۹-۱- دامنه تغییرات ورودی‌ها

۷۳ نوع PCM تولید شده توسط شرکت pcmproduct مختلف با خواص ترموفیزیکی متفاوت به‌عنوان ورودی برای نوع PCM در نظر گرفته شد [۲۲]. دامنه تغییرات برای جرم PCM، ۱ تا ۵۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد و برای جرم آب شور درون حوضچه نیز محدوده ۲۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم که متناظر با ۲ سانتی‌متر تا ۲۰ سانتی‌متر است، انتخاب گردید. با توجه به ضخامت‌های موجود برای شیشه نیز، محدوده ۲ تا ۲۰ میلی‌متر برای ضخامت پوشش شیشه‌ای در نظر گرفته شد.

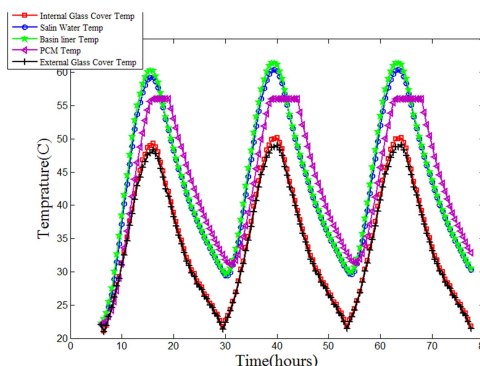
۹-۲- مقادیر بهینه

تعداد نسل‌های بکار گرفته شده در الگوریتم در هر تکرار ۷۰ و تعداد تکرار در هر بار اجرای برنامه ۵۰۰ بوده است. مقادیر ترکیب و جهش در الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۰/۸ و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰ نحوه همگرایی تابع هدف برحسب تعداد دفعاتی که این تابع بررسی شده است دیده می‌شود.



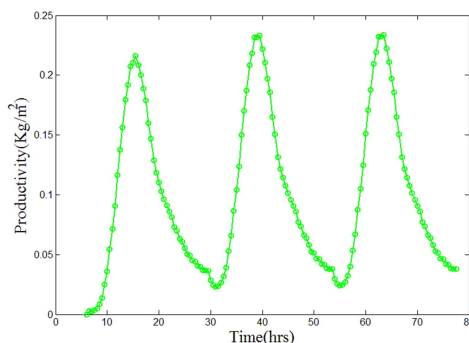
شکل ۱۰- همگرایی تابع هدف برحسب دفعات تکرار تابع هدف

مقدار هدف و مقادیر بهینه چهار متغیری که در الگوریتم ژنتیک



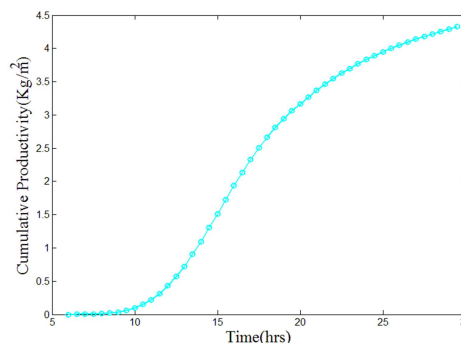
شکل ۷- دمای اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن در سه روز متوالی

از شکل ۷ این نتیجه به دست می‌آید که دمای حداکثر آب در روز دوم نسبت به روز اول حدود ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش پیدا کرده است. از طرفی فرآیند تغییر فاز در PCM در روز اول از ساعت ۱۵:۳۰ شروع و به مدت ۳/۵ ساعت ادامه دارد اما در روز بعدی از ساعت ۱۴:۳۰ شروع و به مدت ۵:۳۰ تا ساعت ۲۰:۰۰ ادامه پیدا می‌کند. از شکل ۸ مشخص است که مقدار حداکثر آب تولیدی در روز دوم نسبت به روز اول افزایش داشته است. جرم آب تولیدی بیشینه در روز اول $\frac{Kg}{m^2}$ ۰/۲۱۶۷ و در روز دوم $\frac{Kg}{m^2}$ ۰/۲۳۳۳ می‌باشد.



شکل ۸- نرخ آب شیرین تولیدی در سه روز متوالی

با داشتن مقادیر آب شیرین تولیدی در بازه‌های نیم ساعته در آب‌شیرین‌کن همراه با PCM، مقدار آب شیرین کلی تا هر زمان را به‌صورت تجمعی در شکل ۹ رسم شده است.



شکل ۹- میزان آب شیرین تولیدی به‌صورت تجمعی

به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شده بود و به ازای این مقادیر، هدف یا آب شیرین تولیدی سالانه حداکثر می‌شود در جدول ۳ آمده است. PCM بهینه، یک PCM از نوع هیدرات نمک است که توسط یک شرکت انگلیسی به نام pcmproduct با کد S58 ارائه می‌گردد. خواص فیزیکی این PCM در جدول ۴ آمده است.

PCM مورد نظر نسبت به بقیه PCMها دارای چگالی به مراتب بالاتری است. بالا بودن چگالی موجب کاهش حجم به ازای واحد جرم خواهد شد. کاهش حجم PCM نیز کاهش ضخامت را در پی خواهد داشت. همچنین ضریب انتقال گرما نیز در این نوع از PCM نسبت به سایر PCMها بالاتر است. لازم به ذکر است در حالت کلی این نوع از PCMها (هیدرات نمک) در مقایسه با پارافین‌ها و اسیدهای چرب چگالی و رسانایی گرمایی بالاتری دارند. طبیعتاً هرچقدر ضخامت PCM کمتر و رسانایی گرمایی آن بیشتر باشد، انتقال گرما بین PCM و جاذب بالاتر خواهد بود که سبب بهبود فرآیند شارژ و تخلیه در سامانه مذکور می‌شود.

جدول ۳- مقدار هدف و مقادیر بهینه ورودی به سامانه

حداکثر دمای آب (°C)	راندمان انرژی $\eta_{ex} (\%)$	راندمان اکسرژی $\eta_{en} (\%)$	جرم آب شیرین تولیدی سالانه (kg/year)
۷۱٫۳۴	۴٫۹۷	۵۶٫۲۴	۱۶۳۲
ضخامت شیشه (mm)	جرم آب (kg)	جرم (kg) PCM	
۱۵٫۲	۳۰	۳٫۱۴	

جدول ۴- خواص فیزیکی PCM بهینه

نوع PCM	گرمای ویژه $C_p (J/kg K)$	رسانایی گرمایی $K (W/m K)$
S58	۲٫۵۵	۰٫۶۹
چگالی $\rho (kg/m^3)$	دمای ذوب $T_m (°C)$	گرمای نهان $L (kJ/kg)$
۱۵۰۵	۵۸	۱۴۵

۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

خصوصیات فیزیکی کلیدی برای انتخاب PCM دمای ذوب آن، چگالی آن و رسانایی گرمایی آن است. اگر PCM دارای چگالی بالاتر و رسانایی گرمایی بالاتری باشد، میزان آب شیرین تولیدی نیز بیشتر خواهد بود. همچنین به دست آمد که هرچقدر جرم آب شور درون حوضچه کمتر باشد، میزان آب شیرین تولیدی بیشتر است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به منظور شرایط بهینه میبایست نقطه ذوب PCM از بیشینه دمایی که آب شور در تابستان به آن می‌رسد کمتر اما به آن نزدیک باشد.

از الگوریتم ژنتیک به‌دست آمد که مقدار بهینه PCM در این نوع از آب‌شیرین‌کن‌ها مقدار بالایی نمی‌باشد و در اکثر مواقع با افزایش جرم PCM میزان آب شیرین تولیدی کاهش پیدا می‌کند. برای ضخامت شیشه نیز مقدار بهینه قابل پیش‌بینی نبوده و برای هر شرایط آب‌وهوایی خاص، مقدار ویژه‌ای خواهد بود. مقدار بهینه ضخامت شیشه غالباً به کران بالای محدوده‌ای که برای ضخامت شیشه در نظر گرفته می‌شود، نزدیک است.

۱۱- نماد

A_b	مساحت سطح جاذب (m^2)
A_g	مساحت سطح پوشش شیشه ای (m^2)
A_{pcm}	مساحت سطح PCM (m^2)
A_w	مساحت سطح آب (m^2)
C_{pb}	گرمای ویژه جاذب ($J/kg °C$)
C_{pg}	گرمای ویژه پوشش شیشه ای ($J/kg °C$)
C_{pcm}	گرمای ویژه PCM ($J/kg °C$)
C_{pw}	گرمای ویژه آب ($J/kg °C$)
C_{ps}	گرمای ویژه PCM در فاز جامد ($J/kg °C$)
C_{pi}	گرمای ویژه PCM در فاز مایع ($J/kg °C$)
e_g	ضخامت پوشش شیشه ای (m)
e_i	ضخامت عایق (m)
I	شدت تابش خورشید (W/m^2)
K_g	رسانایی گرمایی پوشش شیشه ای ($W/m °C$)
L_f	گرمای نهان PCM (J/kg)
K_i	رسانایی گرمایی عایق ($W/m °C$)
K_{pcm}	رسانایی گرمایی ه PCM ($W/m °C$)
m_b	جرم جاذب (kg)
m_g	جرم پوشش شیشه ای (kg)
m_{pcm}	جرم PCM (kg)
m_w	جرم آب (kg)
T_a	دمای محیط ($°C$)
T_b	دمای جاذب ($°C$)
T_{gi}	دمای سطح داخلی پوشش شیشه ای ($°C$)
T_{go}	دمای سطح خارجی پوشش شیشه ای ($°C$)
T_m	دمای نقطه ذوب PCM ($°C$)
T_{pcm}	دمای PCM ($°C$)
T_w	دمای آب ($°C$)
U_b	ضریب انتقال گرمای کلی از PCM به محیط ($W/m^2 °C$)

۱۱-۱- حروف یونانی (بدون بعد)

α_g	ضریب جذب پوشش شیشه ای
α_p	ضریب جذب جاذب
α_w	ضریب جذب آب ضریب جذب آب
ε_g	ضریب نشر پوشش شیشه ای
ε_w	ضریب نشر آب
ε_{eff}	دمای موثر بین آب و پوشش شیشه ای
τ_g	ضریب عبور پوشش شیشه ای
τ_w	ضریب عبور آب

۱۲- پیوست

۱۲-۱- ضرایب انتقال گرما

$$h_{avg} = \sigma \varepsilon_{eff} (T_w^2 + T_{gi}^2) (T_w + T_{gi})$$

که در آن

۱۳- مراجع

- [1] Voropoulos K., Mathioulakis E., and Belessiotis V., Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank, *Desalination*, vol.156, pp.315 – 322, 2003.
- [2] Velmurugan V., Gopalakrishnan M., Raghu R., and Srihar K., Single basin solar still with fin for enhancing productivity, *Energy Conversion and Management*, vol.49, pp.2602 – 2608, 2008.
- [3] El-Sebaei A. A., Ramadan M. R. I., Aboul-Encin S., and N. Salem, Thermal performance of a single-basin solar still integrated with a shallow solar pond, *Energy Conversion and Management*, Vol.49, pp.2839 – 2848, 2008.
- [4] El-Sebaei A. A., Yaghmour S. J., Al-Hazmi F. S., Faidah A. S., Al-Marzouki F. M., and Al-Ghamdi A. A., Active single basin solar still with a sensible storage medium, *Desalination*, Vol.249, pp.699 – 706, 2009.
- [5] Abdallah S., Abu-Khader M. M., and Badran O., Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills, *Desalination*, Vol.242, pp.128 – 137, 2009.
- [6] Velmurugan V. and Srihar K., Performance analysis of solar stills based on various factors affecting the productivity—a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, pp.1294 – 1304, 2011.
- [7] Khalifa A. N., Evaluation and energy balance study of a solar still with an internal condenser, *Solar Energy Research*, Vol.3, pp.1 – 11, 1985.
- [8] Ahmed S. T., Study of single-effect solar still with an internal condenser, *Solar & Wind Technology*, Vol.5, pp.637 – 643, 1988.
- [9] Tamimi A., Performance of a Solar Still with Reflectors and Black Dye, *International Journal of Solar Energy*, Vol.5, pp.229 – 235, 1987.
- [10] Sodha M. S., Nayak J. K., Tiwari G. N., and Kumar A., Double basin solar still, *Energy Conversion and Management*, Vol.20, pp.23 – 32, 1980.
- [11] Okeke C. E., Egarievwe S. U., and Animalu A. O. E., Effects of coal and charcoal on solar-still performance, *Energy*, Vol.15, pp.1071 – 1073, 1990.
- [12] Alsaad M. A., A sub-atmospheric solar distillation unit, *International Journal of Solar Energy*, Vol.5, pp.129 – 141, 1987.
- [13] Yeh H., Ten L., and Chen L., Basin type solar distillers with reduced pressure for improved performance, *Energy*, Vol.10, pp.683 – 688, 1985.
- [14] Tiwari G. N., and Bapeshwara Rao V. S. V., Transient performance of a single basin solar still with water flowing over the glass cover, *Desalination*, Vol.49, pp.231 – 241, 1984.
- [15] Ali H. M., Experimental study on air motion effect inside the solar still on still performance, *Energy Conversion and Management*, Vol.32, pp.67 – 70, 1991.
- [16] Kabeel A., Omara Z., and Younes M., Techniques used to improve the performance of the stepped solar still a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.46, pp.178 – 188, 2015.
- [17] Elango C., Gunasekaran N., and Sampathkumar K., Thermal models of solar still a comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.47, pp.856 – 911, 2015.
- [18] Rajasekhara G., Eswaramoorthy M., Performance Evaluation on Solar Still Integrated with Nano Composite Phase Change Materials, *Applied Solar Energy*, Vol. 51, pp. 15–21, 2015.
- [19] El-Sebaei A. A., Al-Ghamdi A. A., Al-Hazmi F. S., and Faidah A. S., Thermal performance of a single

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)^{-1}$$

$$h_{cwg} = 0.884 \left[T_w - T_{gi} + \frac{T_w(P_w - P_{gi})}{(268900 - P_w)} \right]^{1/3}$$

که در رابطه بالا P_w و P_g فشار اشباع بخار در دماهای T_w و T_g می‌باشند که از فرمول‌های زیر قابل محاسبه است [۲۳].

$$P_{w,g} = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T_{w,g} + 273} \right)$$

$$h_{ewg} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cwg} \left[\frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} \right]$$

$$h_{cbw} = \frac{Nu.k}{L_c}$$

$$\text{if } Gr < 10^5 \rightarrow Nu = 1 \rightarrow h_{cbw} = \frac{k}{L_c}$$

$$\text{if } 10^5 < Gr < 2 \times 10^7 \rightarrow Nu = 0.54(Gr.Pr)^{0.25}$$

$$\text{if } Gr > 2 \times 10^7 \rightarrow Nu = 0.14(Gr.Pr)^{0.33}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$Gr = \frac{L_c^3 \rho g \beta (T_b - T_w)}{\mu^2}$$

$$T_s = 0.0552 \times T_a^{1.5}$$

$$\begin{cases} P_w = \tau_g \alpha_w G \\ P_g = \alpha_g G \\ P_b = \tau_g \tau_w \alpha_p \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1 = \frac{m_g C_{p,g}}{A_g} \\ x_2 = \frac{m_w C_{p,w}}{A_w} \\ x_3 = \frac{m_p C_{p,p}}{A_p} \\ x_4 = \frac{m_{pcm} C_{p,pcm}}{A_{pcm}} \end{cases}$$

۱۲-۲- خواص فیزیکی Paraffin wax

جدول ۵ - خواص فیزیکی Paraffin wax

رسانایی گرمایی مایع / جامد K (w/m K)	گرمای ویژه مایع / جامد Cp (J/kg K)	PCM
۰/۲۴	۲۹۵۰ / ۲۵۱۰	Paraffin wax
گرمای نهان L _f (kJ/kg)	دمای ذوب T _m (°C)	چگالی مایع / جامد ρ (kg/m ³)
۲۲۶	۵۶	۸۱۸ / ۷۶۰

- basin solar still with PCM as a storage medium, *Applied Energy*, Vol.86, pp.1187 – 1195, 2009.
- [20] Morad M. M., El-Maghawry H. A. M., and Wasfy K. I., Improving the double slope solar still performance by using flat-plate solar collector and cooling glass cover,” *Desalination*, Vol.373, pp.1 – 9, 2015.
- [21] Ansari O., Asbik M., Bah A., Arbaoui A., and Khmou A., Desalination of the brackish water using a passive solar still with a heat energy storage system,” *Desalination*, Vol.324, pp.10 – 20, 2013.
- [22] www.pcmproducts.net
- [23] Gaur M. K., and Tiwari G. N., Optimization of number of collectors for integrated PV/T hybrid active solar still,” *Applied Energy*, Vol.87, pp.1763 – 1772, 2010.