

## بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی آبگرمکن خورشیدی با در نظر گرفتن الگوی مصرف

عباس رجبی خانقاهی<sup>۱</sup>، علی عباس نژاد<sup>۲\*</sup>، مجید عمیدپور<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۸	یکی از موضوعاتی که در طراحی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی کمتر مورد توجه قرار گرفته است، توجه به چگونگی توزیع آب گرم برای مصارف گوناگون در طول روز می‌باشد. اصولاً در نصب کلکتورها، دریافت حداکثری تشعشع روی یک مترمربع از سطح کلکتور بدون در نظر گرفتن مصرف آب گرم و پارامترهای دیگر مورد توجه قرار می‌گیرد در حالی که می‌توان جهت‌گیری کلکتورها را طوری تعیین نمود که بیشترین جذب انرژی از یک سطح با بازده حرارتی بالاتر با توجه به ساعات مصرف و تغییرات دمای مخزن وجود داشته باشد. در اصول محاسبات خورشیدی به‌وضوح تأثیر طول، عرض و ارتفاع جغرافیایی بر زاویه کلکتور ارائه شده است، اما تأثیر الگو و چگونگی توزیع مصرف به‌ویژه بر جهت‌گیری کلکتور کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی شامل زوایای کلکتورها، سطح آن‌ها و حجم مخزن ذخیره با در نظر گرفتن الگوی مصرف آب گرم است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با حالت متداول که هدف، فقط دریافت حداکثری تشعشع است نشان‌دهنده افزایشی ۷٪ صرفه‌جویی انرژی سالیانه و ۱/۵٪ صرفه‌جویی اقتصادی می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۲	
<b>واژگان کلیدی:</b> آبگرمکن خورشیدی، الگوی مصرف، جهت‌گیری صفحه جذب، بهینه‌سازی.	

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار دی اکسید کربن به دلیل کاربرد این منابع، تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر مخصوصاً انرژی خورشیدی افزایش یافته است. آبگرمکن‌های خورشیدی یک کاربرد عملی برای جایگزینی آبگرمکن‌هایی هستند که با انواع سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی و سوخت‌های گران مانند الکتروسیسته کار می‌کنند. سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی یکی از مؤثرترین راه‌ها برای تولید آب گرم برای کاربردهای خانگی، اداری، تجاری، صنعتی و مدارس و

دیگر کاربردها می‌باشند. یک سیستم گرمایش آب خورشیدی در بیشتر شرایط آب و هوایی با به کنترل درآوردن انرژی خورشیدی آن را تبدیل به انرژی مفید حرارتی می‌کند. برای رسیدن به ماکزیمم راندمان در آبگرمکن‌های خورشیدی نیاز است تا به مناسب‌ترین پارامترهای طراحی دست‌یافت. پارامترهای طراحی شامل سطح کلکتورها، حجم مخزن، زاویه شیب صفحه کلکتور ( $\beta$ ) و زاویه سمت صفحه کلکتور ( $\gamma$ ) می‌باشد. نوع و نحوه مصرف آب گرم در کاربردهای گوناگون (خانگی، تجاری، اداری و...) از جمله مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: abbasnejad@shahroodut.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود

۳. استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

خورشیدی روی در نمودار سطح کلکتور در مقابل حجم مخزن با مدل تانک کاملاً مخلوط شونده ارائه شده‌اند. در این مطالعه مشاهده شده است که یک مینی‌موم و همچنین یک ماکزیمم حجم مخزن برای هر کسر خورشیدی معین و سطح کلکتور وجود دارد. بعلاوه، وجود یک مینی‌موم و ماکزیمم سطح کلکتور برای یک کسر خورشیدی و حجم مخزن ثابت مشاهده شده است. هدف اصلی تحقیق در مطالعه‌ی کیم و همکارانش<sup>۱۵</sup> [۲۲]، بهینه‌سازی کارایی طولانی‌مدت یک واحد گرمایش آب خورشیدی غیرمستقیم فعال با بکار بردن میکرو الگوریتم ژنتیک بوده است. نتایج نشان می‌دهد یک تطابق خوب بین متوسط ماهیانه اندازه-گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی تشعشع عمومی افقی وجود دارد. آن‌گونه که می‌توان دریافت روی تأثیر نوع و نحوی مصرف آب گرم روی جهت‌گیری بهینه و زاویه شیب کلکتورها مطالعه زیادی انجام نشده است. با توجه به مطالعات انجام‌شده روی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی، تأثیر نوع و نحوه‌ی مصرف روی پارامترهای طراحی بخصوص جهت‌گیری کلکتورها و زاویه شیب آن‌ها مطالعات اندکی انجام شده است. در واقع بیشتر مطالعات انجام شده برای انتخاب زوایای بهینه در حالتی بوده است که کلکتورها را به‌صورت جداگانه و بدون دخالت تأثیر نوع و نحوه‌ی مصرف آب گرم بررسی کرده‌اند و روابطی نیز برای مقدار بهینه‌ی این زوایا ارائه شده است. در رابطه با تأثیر الگوی مصرف آب گرم روی پارامترهای مختلف طراحی آبگرمکن خورشیدی تحقیقاتی تاکنون انجام شده است. برای مثال، باکلز و کلین<sup>۱۶</sup> روش‌های مختلفی برای تست کردن مخزن آب گرم خانگی با کاربرد چندین پروفایل مصرف آب گرم خانگی استفاده کرده‌اند [۲۳]. همچنین، جردن و واژن<sup>۱۷</sup> الگوهای مختلف مصرف آب گرم را برای

روی پارامترهای بهینه‌ی طراحی می‌باشد. الگوی مصرف آب گرم در هر کاربردی به تعداد افراد، فرهنگ مصرف و نوع کاربری بستگی دارد. در دهه‌های گذشته، برای دست یافتن به بهترین پارامترهای طراحی، تحقیقات گسترده‌ای هم در زمینه‌ی شبیه‌سازی و هم در زمینه‌ی بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی انجام شده است. برای مثال، با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی ترنسیس، تحقیقاتی روی تأثیر پارامترهای گوناگون بر طراحی بهینه آب گرمکنهای خورشیدی انجام شده است [۸-۱]. همچنین، مدل‌های شبیه‌سازی برای طراحی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی به کار برده شده است [۷ و ۹-۱۳]. در زمینه‌ی بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی نیز فعالیت‌های زیادی انجام شده است. برای مثال، روش‌های بهینه‌سازی خطی و غیرخطی در سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی به کار گرفته شده است [۱۴-۱۵]. همچنین، الگوریتم‌های تحقیق تکاملی نیز در تکنیک‌های بهینه‌سازی به کاررفته است [۶-۵ و ۱۶]. بیشتر مطالعات در زمینه‌ی بهینه‌سازی در سال‌های اخیر توابع هدفی متفاوتی داشته‌اند. به‌عنوان مثال چانگ<sup>۳</sup>، هاوالدر<sup>۴</sup> و کولکارنی<sup>۵</sup> هزینه‌ی سیکل سالیانه [۱۷-۱۸]، قونیم<sup>۶</sup>، کالوگیرو<sup>۷</sup>، بارلی<sup>۸</sup> و گوردون<sup>۹</sup> صرفه‌جویی دوره‌ی عمر [۲ و ۱۹-۲۰]، بارلی نرخ بازگشت داخلی [۱۹]، لومانس<sup>۱۰</sup>، میکائلسون<sup>۱۱</sup> و بور<sup>۱۲</sup> بازگشت سرمایه [۵ و ۱۴ و ۲۱]، شاریاه<sup>۱۳</sup>، حبی و ماترووی<sup>۱۴</sup> راندمان سالیانه و کسر خورشیدی [۳ و ۸ و ۱۵] را به‌عنوان تابع هدف انتخاب کردند. در دو بررسی [۱۸] و [۲۲] به ترتیب " تعیین فضای طراحی " و " آنالیز حرارتی و ارزیابی اقتصادی " را برای بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی ارائه شده است. فضای طراحی در مطالعه‌ی کولکارنی و همکارانش [۱۸] با کشیدن خطوط ثابت کسر

<sup>11</sup> Michelson et al

<sup>12</sup>Boer et al

<sup>13</sup>Shariah et al

<sup>14</sup>Matrawy et al

<sup>15</sup>Kim et al

<sup>16</sup>Buckles and Klein

<sup>17</sup>Jordan and Vajen

<sup>3</sup> Chang et al

<sup>4</sup>Hawladar et al

<sup>5</sup>Kulkarni et al

<sup>6</sup> Ghoneim et al

<sup>7</sup>Kalogirou et al

<sup>8</sup> Barely et al

<sup>9</sup>Gordon et al

<sup>10</sup>Loomans et al

می‌شود. تشعشع دیفیوز شامل سه قسمت است. قسمت اول، بخش ایزوتروپیک که به‌طور یکنواخت از تمام گنبد آسمان دریافت می‌شود. قسمت دوم بخشی از تشعشع دیفیوز است که در اطراف تشعشع مستقیم وجود دارد و به‌عنوان بخش دور خورشید<sup>۲۱</sup> (قسمتی از تشعشع دیفیوز که در اطراف تشعشع مستقیم است) می‌باشد که در نتیجه‌ی پراکندگی روبه‌جلو تشعشع خورشیدی و تمرکز در آسمان اطراف خورشید است. سومین بخش نیز روشنایی افق است که در اثر تمرکز در نزدیکی افق حاصل می‌شود [۲۷]. بنابراین، تشعشع دیفیوز را به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$I_{T,d} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} \quad (1)$$

در معادله بالا تشعشع دیفیوز کلی روی سطح شیب‌دار برابر با جمع سه بخش تشعشع دیفیوز که به ترتیب با یکدیگر جمع شده‌اند. مدل‌های تشعشع گوناگونی شامل مدل ایزوتروپیک، مدل پرز و همکارانش<sup>۲۲</sup> وجود دارد. در میان این مدل‌ها تنها مدل پرز شامل تمام قسمت‌های تشعشع دیفیوز می‌باشد. برای سطوحی با زاویه سمت صفحه دور از صفر در نیمکره‌ی شمالی و ۱۸۰ درجه در نیمکره‌ی جنوبی مدل پرز پیشنهاد می‌شود [۲۷]. در این مقاله نیز برای رسیدن به مدل تشعشع مناسب، چون هدف بررسی تأثیر الگوهای مصرف بر جهت‌گیری کلکتورها است مدل تشعشع پرز به‌کاررفته است.

تشعشع کلی روی سطح کلکتورها در مدل پرز شامل ۵ قسمت است: مستقیم، ایزوتروپیک، دیفیوز اطراف تشعشع مستقیم، روشنایی افق، بازتابش از زمین.

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I F_2 \sin \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

که  $I_b$  تشعشع مستقیم،  $I$  مجموع تشعشع مستقیم و دیفیوز،  $\beta$  زاویه شیب کلکتور و  $\rho_g$  ضریب بازتابش سطح زمین می‌باشد. فاکتور هندسی  $R_b (= \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z})$ ، نسبت تشعشع مستقیم روی سطح شیب‌دار به همان تشعشع روی

آبگرمکن‌های خورشیدی مختلف به کار برده‌اند [۲۴]. تأثیر الگوی مصرف آب گرم روزانه‌ی خانگی بر کارایی مخزن آب گرم توسط اسپار و همکارانش<sup>۱۸</sup> [۲۵]، و بر روی فضای بهینه طراحی توسط کولکاری و همکارانش<sup>۱۹</sup> [۱۸] نیز بررسی شده است. الگوی مصرف آب گرم به‌عنوان پارامتری مؤثر در بهینه‌سازی سیستم گرمایش آب خانگی از طریق پر کردن مجدد (باز پرکنی) آب<sup>۲۰</sup> [۲۶] و برای مشاهده‌ی تأثیر روی راندمان سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی [۸] به‌کاررفته است. با توجه به مطالعات گذشته در زمینه‌ی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی، تأثیر الگوهای مصرف آب گرم بر روی پارامترهای طراحی بخصوص جهت‌گیری کلکتورها به صورت همزمان کمتر مورد توجه گرفته است. با توجه به اهمیت بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی در صرفه‌جویی انرژی و هزینه سعی شده است تا در این زمینه (که حداقل در کشور ایران بررسی نشده است) مطالعاتی انجام شود. در این مقاله، تأثیر الگوهای مصرف آب گرم روی پارامترهای طراحی بخصوص جهت‌گیری و شیب کلکتور دیده شده است. ابتدا تأثیر الگوهای مصرف کاربرد روی جهت‌گیری و شیب کلکتور و پارامترهای دیگر طراحی بررسی شده است. میزان صرفه‌جویی انرژی در اثر بهینه شدن زوایای سمت صفحه و شیب کلکتور مطالعه و چند نوع سیستم گرمایش آب خورشیدی مقایسه شده‌اند. و در ادامه تأثیر افزایش و یا کاهش مصرف روی جهت‌گیری و شیب کلکتورها بررسی شده است.

## ۲- توصیف مدل

### ۲-۱- مدل ریاضی تشعشع

تشعشع کلی شامل تشعشع مستقیم، تشعشع پخشی و بازتابش از زمین می‌باشد. تشعشع پخشی یا دیفیوز مهم‌ترین پارامتر در محاسبه‌ی تشعشع کلی است و تأثیر جهت‌گیری کلکتور در این قسمت از تشعشع مشاهده

<sup>21</sup> Circumsolar

<sup>22</sup> Perez et al

<sup>18</sup> Spur et al

<sup>19</sup> Kulkarni et al

<sup>20</sup> Replenishment water

یک سیستم گرمایش آب خورشیدی ترکیب یک مجموعه کلکتور خورشیدی، سیستم انتقال انرژی و تانک ذخیره است. بخش اصلی یک آبگرمکن خورشیدی کلکتورها هستند که تشعشع را جذب کرده و به انرژی حرارتی مفید تبدیل می‌کند. این گرما سپس توسط سیال انتقال حرارت (آب، محلول اتیلن گلیکول در آب و هوا) که در سراسر کلکتور می‌چرخند جذب می‌شود. این حرارت می‌تواند ذخیره شود یا به طور مستقیم به کار رود [۲۸]. هفت نوع سیستم گرمایش آب خورشیدی را می‌توان برای گرمایش آب مصرفی می‌توان به کاربرد. همان طوری که در جدول ۲ نشان داده شده است سه نوع سیستم در این مقاله بررسی شده است که شامل سیستم اجباری مستقیم، غیرمستقیم بدون مخزن تخلیه و با مخزن تخلیه می‌باشد.

دیگرام شماتیکی سیستم گرمایش آب خورشیدی غیرمستقیم بدون مخزن تخلیه در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم گرمایش آب خورشیدی یک سیستم بدون مخزن تخلیه و شامل مبدل حرارتی داخلی می‌باشد. در این سیستم، محلول آب و اتیلن گلیکول در یک سیکل بسته درون لوله‌های کلکتور می‌چرخند و گرمای جذب شده از طریق مبدل حرارتی به آب داخل تانک منتقل می‌شود. مقدار انرژی مفیدی که در هر لحظه توسط کلکتور جذب می‌شود عبارتست از:

$$\frac{dq_{gain}}{dt} = \dot{q}_{gain} = \eta_{col} A_C G_T \quad (10)$$

در این معادله  $A_C$  سطح کلکتور برحسب مترمربع و  $G_T$  مقدار تشعشع روی سطح شیب‌دار برحسب  $\frac{W}{m^2}$  می‌باشد. راندمان کلکتور،  $\eta_{col}$  را از معادله‌ی خطی زیر می‌توان به دست آورد:

$$\eta_{col} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{ci} - T_{amb})}{G_T} \quad (11)$$

که  $T_{ci}$  دمای سیال ورودی به کلکتور و  $T_{amb}$  دمای محیط می‌باشند. انرژی جذب شده از طرف دیگر برابر است با:

$$\dot{q}_{gain} = \dot{m}_{col} C_{pw} (T_{colo} - T_{colt}) \quad (12)$$

سطح افقی در هر زمان است. زوایای  $\theta$  و  $\theta_z$  به ترتیب زوایای تابش و سمت‌الرأس و  $F_1$  و  $F_2$  ضرایب تشعشع اطراف تشعشع مستقیم و روشنایی افق هستند.  $a$  و  $b$  برای محاسبه‌ی زاویه‌ی تابش در مخروط تشعشع اطراف تشعشع مستقیم روی سطح شیب‌دار و افقی به کار می‌روند که به صورت زیر بیان می‌شود [۲۷].

$$\begin{aligned} a &= \max[0, \cos\theta] \\ b &= \max[\cos 85, \cos\theta_z] \end{aligned} \quad (3)$$

ضرایب روشنایی  $F_1$  و  $F_2$  تابعی از سه پارامتر که شرایط آسمان را توصیف می‌کنند، هستند. این سه پارامتر عبارت‌اند از زاویه‌ی سمت‌الرأس ( $\theta_z$ )، روشنایی یا وضوح ( $\varepsilon$ )، درخشندگی ( $\Delta$ ) که  $\varepsilon$  تابعی از تشعشع دیفیوز ساعتی  $I_d$  و تشعشع مستقیم  $I_b$  می‌باشد.

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5.535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (4)$$

که  $\theta_z$  برحسب درجه و  $I_n$  به صورت  $\frac{I_b}{\cos\theta_z}$  تعریف می‌شود.

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (5)$$

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (6)$$

$$I_{on} = G_{sc} (1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}) \times 3600 \quad (7)$$

که  $G_{sc}$  ثابت خورشیدی و با مقدار  $\frac{W}{m^2}$  ۱۳۶۷ است. ضرایب روشنایی  $F_1$  و  $F_2$  تابعی ضرایب مشتق شده‌ی آماری برای محدوده‌ی متفاوت  $\varepsilon$  است؛ یک مجموعه‌ی پیشنهادی از ضرایب در جدول ۱ آورده شده است. معادلات مربوط به محاسبه‌ی  $F_1$  و  $F_2$  به شکل زیر می‌باشد:

$$F_1 = \max[0, (f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13})] \quad (8)$$

$$F_2 = (f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{23}) \quad (9)$$

۲-۲- مدل سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی

$M_{col}$  جرم سیال در گردش درون سیستم بسته برحسب  $kg$  و  $C_{p_{col}}$  نیز گرمای ویژه سال انتقال حرارت است. اگر گرمای انتقال یافته به مخزن کمتر از بار حرارتی در هر لحظه باشد، انرژی حرارتی باقیمانده توسط انرژی پشتیبان (کمکی) فراهم می‌شود. که توسط معادله‌ی (۱۹) نمود می‌یابد.

$$\dot{q}_{auxilliary} = \dot{m}_{use} C_{p_w} (T_{load} - T_{aux}) \quad (19)$$

کسر خورشیدی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{load} &= \dot{q}_{use} + \dot{q}_{aux} \\ SF &= \frac{\dot{q}_{load} - \dot{q}_{aux}}{\dot{q}_{load}} = 1 - \frac{\dot{q}_{aux}}{\dot{q}_{load}} \end{aligned} \quad (20)$$

معادلات مربوط به سیستم مستقیم اجباری نیز بسیار مشابه معادلات بالا است. چون تنها تفاوت سیستم مستقیم با سیستم غیرمستقیم بدون مخزن تخلیه وجود مبدل حرارتی است بنابراین معادله‌ی (۱۴) به شکل زیر درمی‌آید.

$$\rho V_{tank} C_{p_w} \frac{dT_{tank}}{dt} = \dot{q}_{trans} - \dot{q}_{use} - \dot{q}_{loss} \quad (21)$$

همچنین به دلیل نبود مبدل در سیستم مستقیم معادله‌ی (۱۸) در این سیستم حذف می‌شود. تفاوت دو سیستم غیرمستقیم در وجود و عدم وجود مخزن تخلیه است. در بیان معادلات مربوط به سیستم غیرمستقیم با مخزن تخلیه باید به این نکته توجه کنیم که معادله‌ی (۱۸) به شکل زیر درمی‌آید.

$$m_{drain tank} C_{p_w} \frac{dT_{ci}}{dt} = \dot{q}_{gain} - \dot{q}_{trans} - \dot{q}_{lossdt} \quad (22)$$

در معادله‌ی بالا  $m_{drain tank}$  حجم آب در گردش درون کلکتورها و مخزن تخلیه است. و  $\dot{q}_{lossdt}$  اتلاف حرارتی از مخزن تخلیه می‌باشد که با معادله‌ی (۲۳) بیان می‌شود.

$$\dot{q}_{lossdt} = U_{drain tank} A_{drain tank} (T_{amb} - T_{ci}) \quad (23)$$

$T_{co}$  دمای سیال خروجی از کلکتور و  $\dot{m}_{col}$  نرخ جریان جرمی سیال کلکتور می‌باشد. با توجه به ضریب تأثیر کلکتور ( $Eff_{HX}$ )، گرمای انتقال یافته به مخزن به شکل زیر تعریف شده است.

$$\dot{q}_{trans} = Eff_{HX} \times \dot{q}_{gain} \quad (13)$$

بالانس انرژی برای مخزن به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود.

$$\rho V_{tank} C_{p_w} \frac{dT_{tank}}{dt} = \dot{q}_{trans} - \dot{q}_{use} - \dot{q}_{loss} \quad (14)$$

در معادله‌ی بالا  $\rho$ ، جرم حجمی آب و  $V_{tank}$ ، حجم تانک و  $C_{p_w}$ ، گرمای ویژه آب داخل تانک می‌باشند.  $\dot{q}_{use}$  انرژی‌ای است که هر لحظه به مصرف می‌رسد و از معادله زیر به دست می‌آید.

$$\dot{q}_{use} = \dot{m}_{use} C_{p_w} (T_{tank} - T_{sup}) \quad (15)$$

که در آن  $T_{sup}$  و  $T_{tank}$  به ترتیب دمای آب تغذیه و دمای تانک با فرض اختلاط کامل مخزن و  $\dot{m}_{use}$  مقدار آب گرم مصرفی بر اساس الگوی مصرف می‌باشند.

انرژی اتلافی از تانک ذخیره با فرمول (۱۶) بیان می‌گردد.

$$\dot{q}_{loss} = U_{tank} A_{tank} (T_{tank} - T_{amb}) \quad (16)$$

مقدار ضریب اتلاف حرارتی کلی ( $U_{tank}$ )، برابر  $0.16 \frac{W}{m^2.K}$  پیشنهاد می‌شود [۲۸].

$A_{tank}$  مساحت سطح خارجی مخزن ذخیره است و از معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$A_{tank} = 2\pi r_{tank}^2 + 2\pi r_{tank} h_{tank} \quad (17)$$

در معادله‌ی (۱۷)،  $r_{tank}$  شعاع تانک ذخیره و  $h_{tank}$  ارتفاع تانک است. موازنه‌ی انرژی برای سیال در گردش درون کلکتورها و مبدل به صورت زیر می‌باشد.

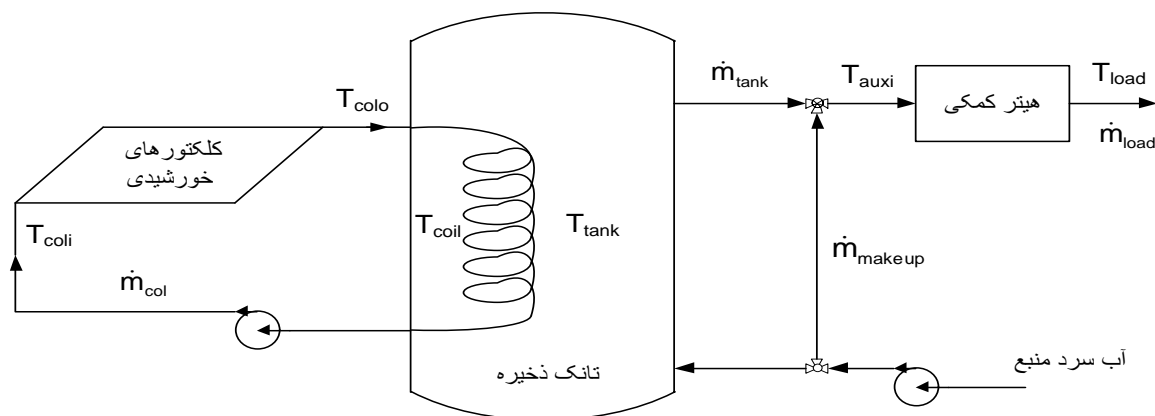
$$M_{col} C_{p_{col}} \frac{dT_{ci}}{dt} = \dot{q}_{gain} - \dot{q}_{trans} \quad (18)$$

جدول ۱- ضرایب روشنایی برای مدل پرز و همکارانش [۲۷]

محدوده‌ی $\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
۰-۱/۰۶۵	-۰/۱۹۶	۱/۰۸۴	-۰/۰۰۶	-۰/۱۱۴	۰/۱۸۰	۰/۰۱۹
۱/۰۶۵-۱/۲۳۰	۰/۲۳۶	۰/۵۱۹	-۰/۱۸۰	-۰/۰۱۱	۰/۰۲۰	-۰/۰۳۸
۱/۲۳۰-۱/۵۰۰	۰/۴۵۴	۰/۳۲۱	-۰/۲۵۵	۰/۰۷۲	-۰/۰۹۸	-۰/۰۴۶
۱/۵۰۰-۱/۹۵۰	۰/۸۶۶	-۰/۳۸۱	-۰/۳۷۵	۰/۲۰۳	-۰/۴۰۳	-۰/۰۴۹
۱/۹۵۰-۲/۸۰۰	۱/۰۲۶	-۰/۷۱۱	-۰/۴۲۶	۰/۲۷۳	-۰/۶۰۲	-۰/۰۶۱
۲/۸۰۰-۴/۵۰۰	۰/۹۷۸	-۰/۹۸۶	-۰/۳۵۰	۰/۲۸۰	-۰/۹۱۵	-۰/۰۲۴
۴/۵۰۰-۶/۲۰۰	۰/۷۴۸	-۰/۹۱۳	-۰/۲۳۶	۰/۱۷۳	-۱/۰۴۵۰	۰/۰۶۵
۶/۲۰۰- $\uparrow$	۰/۳۱۸	-۰/۷۵۷	۰/۱۰۳	۰/۰۶۲	-۱/۶۹۸	۰/۲۳۶

جدول ۲- سیستم گرمایش آب خورشیدی [۲۸]

سیستم غیرفعال	سیستم‌های مستقیم
✓ ترموسیفون (مستقیم و غیرمستقیم)	✓ سیستم‌های گردش مستقیم (حلقه باز فعال)
✓ سیستم‌های یکپارچه کلکتوری ذخیره‌ساز	✓ سیستم‌های گردش غیرمستقیم (حلقه بسته فعال)
	مبدل‌های حرارتی داخلی و خارجی
	✓ سیستم‌های هوایی



شکل ۱- سیستم گرمایش آب خورشیدی

یک مدل غیرخطی با تابع هدف می‌تواند به دو صورت با محدودیت و بدون محدودیت تقسیم‌بندی شود. در این مقاله برای بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی از نظر گاه تأثیر الگوهای مصرف مختلف بر روی جهت‌گیری و زاویه شیب کلکتور و دیگر پارامترهای طراحی تابع هدف اقتصادی انتخاب شده است.

### ۳- روش بهینه‌سازی

برای بهبود عملکرد هر سیستم لازم است تا بهینه‌ترین حالت کارکرد آن سیستم را بیابیم. بدین منظور سیستم موردنظر باید مدل شود. یکی از روش‌های معمول در مدل‌سازی، مدل‌سازی ریاضی است. عمده‌ی مسائل واقعی به‌صورت مدل‌های ریاضی غیرخطی مدل‌سازی می‌شوند.

دست می‌آید که اگر طول این گام تقریباً برابر صفر باشد، محاسبات متوقف شده و جواب به دست آمده همان جواب بهینه خواهد بود. یکی از نکات مهم در این مسأله استفاده از روش نقطه شروع‌های متفاوت<sup>۲۵</sup> برای حل می‌باشد.

در ابتدا بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار Lingo که از قدرتمندترین نرم‌افزارها در حل مسائل خطی و غیرخطی است انجام شد. با توجه به ساختار نرم‌افزار Lingo و زیاد بودن پارامترهای موجود در مدل این نرم‌افزار در بیشتر مواقع قادر به پیدا کردن جواب نبود یا اینکه زمان بسیار زیادی برای حل نیاز بود. لذا برای رسیدن به جواب و توسعه‌ی مدل در سیستم‌های مختلف از EXCEL و زبان برنامه‌نویسی در ماکرو یعنی VBA استفاده شده است.

ضمناً برای اعتبار سنجی روش استفاده شده ابتدا نقاط اولیه متفاوتی برای صحت و اعتبار جواب بکار برده شد، ولی برای اطمینان بیشتر توسط زبان VBA و با گسسته سازی فضای جواب تمامی نقاط موجود در فضای جواب در طی کد نوشته شده در تابع هدف قرار گرفته و نقطه بهینه به دست می‌آید. قابل توجه است که فضای جواب به حالت گسسته درآمده، اما چون در جواب بهینه تأثیری ندارد مشکلی در تابع هدف بهینه ایجاد نمی‌کند. با انجام این عمل به نتیجه یکسانی با الگوریتم بهینه‌سازی دست‌یافتیم که نشان می‌دهد الگوریتم موردنظر در زمان کمتر به جواب درستی دست می‌یابد.

#### ۴- نتایج و بحث

در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای مختلف سیستم و داده‌های ورودی نیاز است. پارامترهای ثابت زیر برای این مسأله در نظر گرفته شده است.

- مکان: تهران با ۳۵ درجه‌ی شمالی، ۵۴/۱ درجه-ی غربی و ارتفاع ۱/۱۴۹ کیلومتر از سطح دریا.
- داده‌های دمای هوا، از سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) [۲۹] استخراج شده است.

$$TCA = (C_c A_c + C_{st} A_{st} + C_{RR}) CRF + C_{aux} Q_{aux} \quad (24)$$

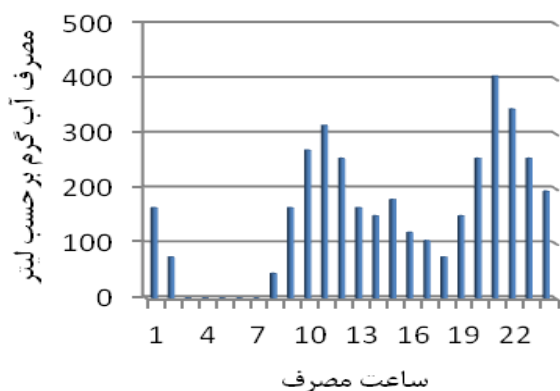
که  $C_c$  هزینه هر مترمربع کلکتور،  $A_c$  مساحت کلکتور،  $C_{st}$  هزینه مخزن به ازای هر مترمربع سطح آن،  $A_{st}$  مساحت جانبی مخزن ذخیره،  $C_{RR}$  هزینه سیستم پشتیبان به ازای هر کیلووات،  $R$  ماکزیمم توان گرمکن کمکی برحسب کیلووات،  $C_{aux}$  هزینه انرژی به ازای هر کیلووات ساعت و  $Q_{aux}$  انرژی کمکی موردنیاز برحسب کیلووات ساعت هستند.

مدل‌سازی ریاضی کلی به شکل زیر است.

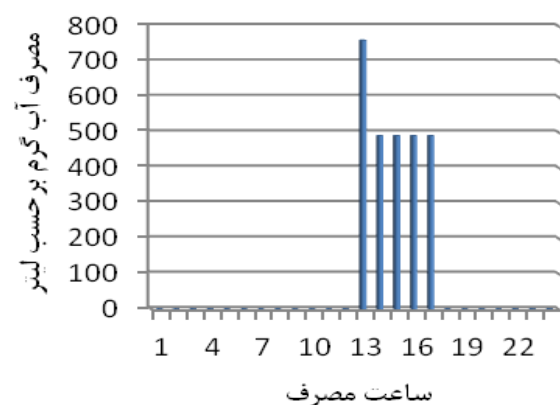
$$\begin{aligned} & \text{Minimize } TCA \\ & \text{subject to} \\ & -180 \leq \gamma \leq 180 \\ & 0 \leq \beta \leq 90 \\ & A_c > 0 \\ & 20 \leq \frac{V_c}{A_c} \leq 180 \\ & T(1,1) = \frac{1}{m_{\tan k} C_{P_w}} [\dot{q}_{trans} - \dot{q}_{use} - \dot{q}_{loss}] \times \Delta t \\ & + T(\text{last interval}) \end{aligned} \quad (25)$$

$T(1,1)$  دمای تانک در بازه‌ی زمانی اول و  $T(\text{last interval})$  دمای تانک در بازه‌ی زمانی انتهایی می‌باشد. پس از مدل‌سازی نوبت به انتخاب روش مناسب بهینه‌سازی است. روش بهینه‌سازی برای دست یافتن به شرایط بهینه‌سازی عمومی<sup>۲۳</sup>، باید بتواند یک سری از معادلات غیرخطی ناهموار را حل کند. مناسب‌ترین روش حل، روش SQP یا Sequential Quadratic programming بوده است. با توجه به غیرخطی بودن و ناهموار بودن<sup>۲۴</sup> روش SQP به دلیل نوع الگوریتم مورد استفاده به عنوان مناسب‌ترین روش در حل این نوع معادلات انتخاب شده است. این روش از الگوریتمی مشابه الگوریتم فرانک-ولف برخوردار است که تابع هدف موجود در مسأله‌ی غیرخطی با بسط دادن و با شروع از نقاط اولیه تبدیل به یک مسأله‌ی خطی شده و تا رسیدن به یک همگرایی مناسب مسأله با نقاط شروع متفاوت تکرار می‌شود. در هر مرحله از این روش برای حرکت از نقطه موجود به نقطه بعدی، یک گام بهینه به

زاویه‌ی ۴۵ درجه نزدیک می‌شوند. شکل ۶ میزان صرفه-جویی‌های انرژی و معادل حال حاضر کل هزینه در طی عمر مفید<sup>۲۷</sup> را در مقایسه باحالتی که زوایای گاما و بتا (شیب) در مقدار دریافت حداکثری تشعشع قرار دارند نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل ۶ نشان می‌دهد میزان صرفه‌جویی انرژی سالیانه در الگوهای مصرف مختلف تا مرز ۷٪ نیز می‌رسد. این عدد بیانگر اهمیت بهینه‌سازی همزمان زوایای مربوط به کلکتورهاست که کمتر مشاهده شده است. میزان صرفه‌جویی اقتصادی (معادل حال حاضر کل هزینه) نیز تا مرز ۱/۵٪ می‌رسد. این میزان نیز با تغییر دو زاویه بسیار چشمگیر است.



شکل ۲- الگوی مصرف آب گرم آپارتمان ۱۵ واحد



شکل ۳- الگوی مصرف آب گرم مدرسه نوبت عصر

- مخزن ذخیره، استوانه‌ای به صورت کاملاً مخلوط شونده و با  $(h/d) = 2$ .
- فاکتور مشخصه، از داده‌های تست استاندارد [۳۰] با  $F_R U_L = 4/64 \frac{W}{m^2 \cdot C}$  و  $F_R (\tau\alpha)_n = 0/84$
- جریان جرمی سیال عامل کلکتور، برابر با مقدار  $0/02 \frac{kg}{s \cdot m^2}$  لحاظ شده است.
- گرمای ویژه سیال انتقال حرارت، از اشرف<sup>۲۶</sup>، ۲۰۰۵ با مقدار  $4022 \frac{J}{kgK} = C_{p_{col}} (20\%)$  اختلاط آب با اتیلن گلیکول).

#### ۴-۱- تأثیر الگوهای مصرف آب گرم کاربردی

##### روی پارامترهای طراحی

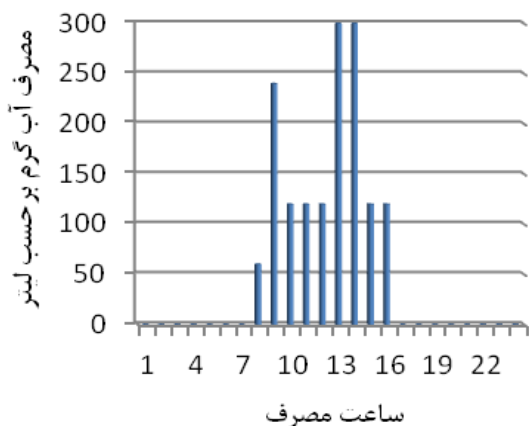
شکل‌های ۲ تا ۵ الگوی مصرف آب گرم را به ترتیب برای کاربردهای خانگی (آپارتمان مسکونی ۱۵ واحد)، اداری، تجاری، مدرسه‌ی نوبت عصر نشان می‌دهد. پارامترهای طراحی بهینه برای این الگوها در جدول ۳ آمده است. آن‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، زاویه‌ی سمت صفحه برای الگوی مصرف مربوط به آپارتمان مسکونی مقدار نزدیک به دریافت حداکثری تشعشع را دارد که این به دلیل وجود مصرف در ساعات بعد غروب خورشید و نبود همزمانی مصرف و جذب می‌باشد.

برای مصارف دیگر مقدار زاویه گاما مثبت است. یعنی کلکتورها باید به سمت غرب جهت‌گیری کنند. این امر در الگوهای تجاری و مدرسه بیشتر و به دلیل همزمانی مصرف و جذب می‌باشد. به دلیل این همزمانی، کلکتورها به سمت زاویه‌ای جهت‌گیری می‌کنند که با پایین آمدن دمای مخزن راندمان کلکتور را حداکثر سازد. بنابراین، می‌توان گفت که برای اغلب واحدها باید به سمت غرب جهت‌گیری شوند. ضمناً شیب کلکتورها همان‌گونه که مشاهده می‌شود به عدد ۴۵ نزدیک است. بنابراین می‌توان گفت که تأثیر مصرف در تمامی الگوها به‌گونه‌ای است که کلکتورها به

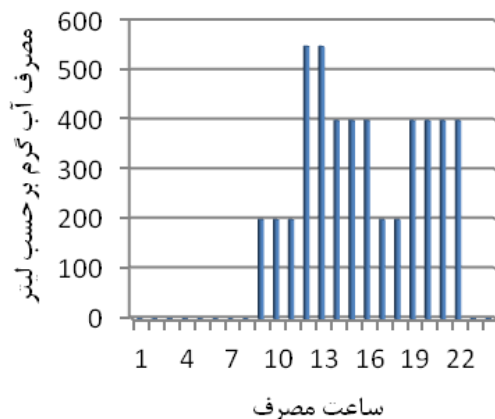
26 ASHRAE

<sup>27</sup> Net present value





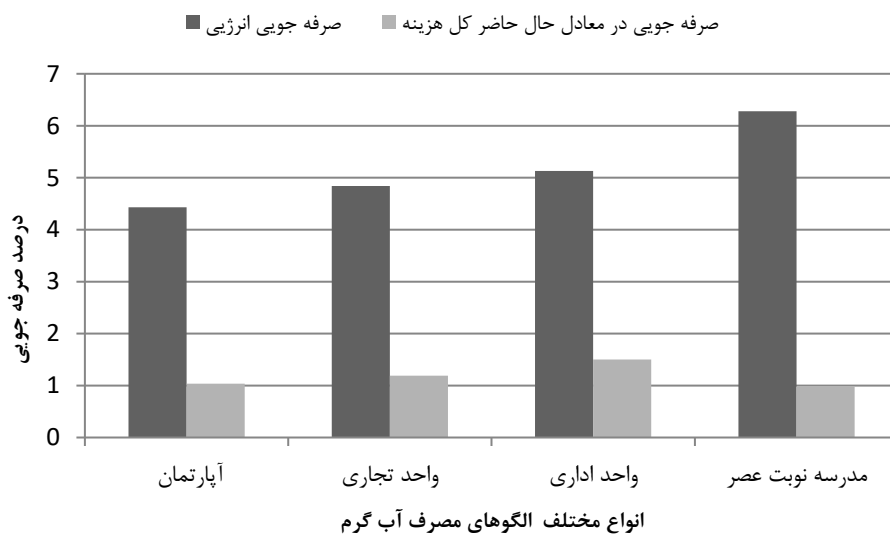
شکل ۵- الگوی مصرف آب گرم واحد اداری



شکل ۴- الگوی مصرف آب گرم واحد تجاری

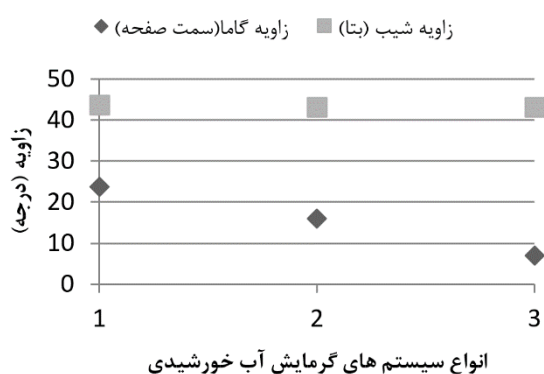
جدول ۳- پارامترهای بهینه برای انواع الگوهای مصرف

پارامترهای بهینه	انواع الگوهای مصرف آب گرم			
	آپارتمان	واحد اداری	مدرسه نوبت عصر	واحد تجاری
$\gamma$	۰/۲۷	۳/۷۶	۱۸	۱۶
$\beta$	۴۳/۱۸	۴۳/۳۱	۴۶/۱۹	۴۳/۷۷
سطح کلکتورها (مترمربع)	۱۱۲/۶۸	۴۸/۶۲	۹۵/۲۱	۱۲۷/۲۳
حجم تانک ذخیره (لیتر)	۳۳۳۱	۱۷۶۱	۳۲۲۸	۳۲۴۹



شکل ۶- درصد صرفه جویی انرژی و معادل حال حاضر کل هزینه برای انواع الگوها

که روند افزایش و کاهش دمایی در سیستم غیرمستقیم بسیار تندتر از سیستم مستقیم است. در واقع در سیستم غیرمستقیم برای رسیدن به ماکزیمم دما و سطح معین از کسر خورشیدی کلکتورها با جهت‌گیری بیشتر و کاهش میزان حجم سعی در رسیدن به این مطلوب دارند. ولی، در سیستم مستقیم چون روند تغییرات دمایی یکنواخت‌تر است بنابراین برای رسیدن به پارامترهای بهینه از جمله کسر خورشیدی معین تأثیر جهت‌گیری کلکتورها کمتر و میزان حجم بیشتری از آب به ازای هر مترمربع از سطح کلکتور قابلیت گرم شدن دارد. همچنین با مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشخص است که میزان مصرف تأثیر چندانی بر زاویه و جهت‌گیری کلکتور ندارد.



شکل ۷- تغییرات زوایای سمت صفحه و شیب کلکتورها در انواع سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی



شکل ۸- تغییرات نسبت حجم مخزن ذخیره به سطح کلکتورها در انواع سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی

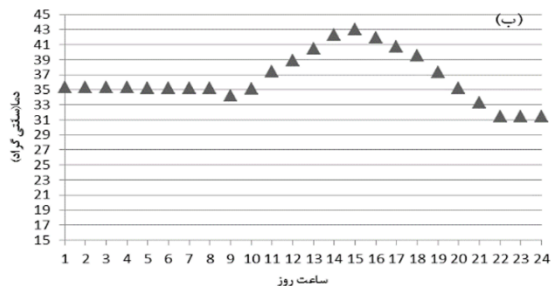
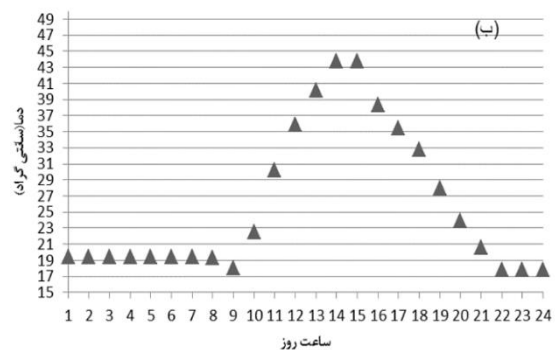
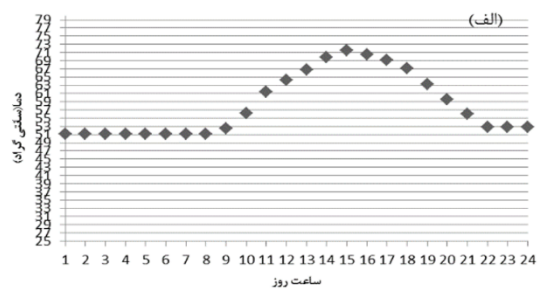
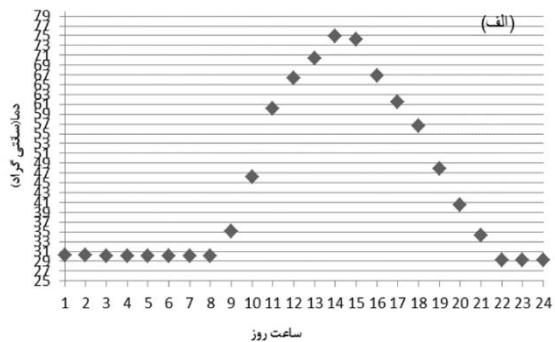
#### ۴-۲- مقایسه‌ی پارامترهای طراحی سیستم-

##### های مختلف گرمایش آب خورشیدی

برای مقایسه سیستم‌های مختلف گرمایش آب خورشیدی، به ترتیب سیستم غیرمستقیم با مخزن تخلیه، غیرمستقیم بدون مخزن تخلیه، مستقیم با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است.

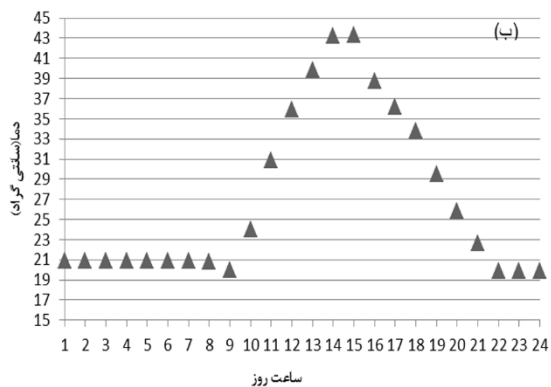
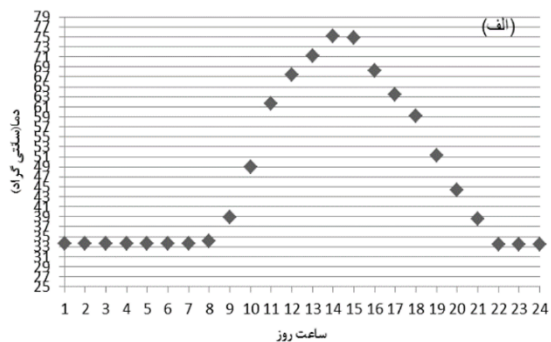
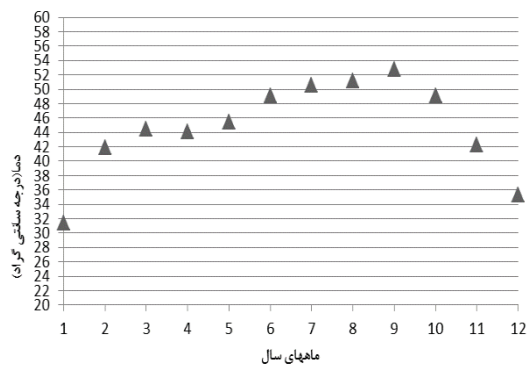
شکل ۷ تغییرات زوایای سمت صفحه (γ) و شیب کلکتور (β) را با توجه به نوع سیستم نشان می‌دهد. در شکل ۷ مشخص است که زاویه‌ی γ در سیستم غیرمستقیم با مخزن بیشترین مقدار و در سیستم مستقیم کمترین مقدار را دارد. یکی از دلایلی که باعث جهت‌گیری زیاد کلکتورها در سیستم غیرمستقیم با مخزن شده اتلافات حرارتی زیاد این نوع سیستم است و کلکتورها با جهت‌گیری سعی در جبران این تلفات داشته تا در ساعات مصرف بیشترین جذب را داشته و در ساعات نبود تشعشع نیز بیشترین راندمان را داشته باشند. زاویه شیب کلکتورها در تمامی این سیستم‌ها مقدار نزدیکی به هم دارند. شکل ۸ میزان تغییرات نسبت حجم مخزن به سطح کلکتورها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸ مقدار این نسبت از ۲۰ تا ۵۷ تغییر می‌کند. بازهم می‌توان گفت که سیستم غیرمستقیم با مخزن تخلیه به دلیل اتلاف حرارتی بیشتر نسبت به بقیه سیستم‌ها، حجم مخزن ذخیره‌ی کمتری را دارا می‌باشد.

شکل‌های ۹ تا ۱۱ تغییرات دمایی مخزن ذخیره در ماه‌های نهم و اول به ترتیب برای سیستم‌های مستقیم، غیرمستقیم بدون مخزن و با مخزن تخلیه نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز دماهای اولیه تانک نمایش‌های مختلف سال را به ترتیب برای دو سیستم مستقیم و غیرمستقیم نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۱۲ و ۱۳ درمی‌یابیم که دماهای اولیه در تانک ذخیره در تمامی ماه‌ها کمتر در سیستم غیرمستقیم کمتر از دماهای تانک در سیستم مستقیم است. علت این موضوع را می‌توان با کاهش دمایی بیشتر در طی ساعات مصرف به دلیل تلفات بیشتر مرتبط دانست. با مشاهده‌ی شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز می‌توان دریافت



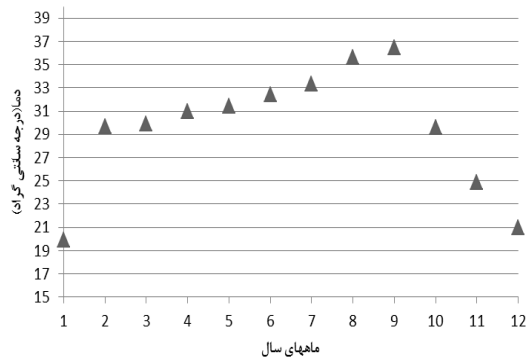
شکل ۹- تغییرات دمایی تانک ذخیره الف) ماه نهم ب) ماه اول در سیستم مستقیم

شکل ۱۱- تغییرات دمایی تانک ذخیره الف) ماه نهم ب) ماه اول در سیستم غیرمستقیم با مخزن تخلیه



شکل ۱۲- تغییرات دمای اولیه تانک ذخیره در ماههای مختلف در سیستم مستقیم

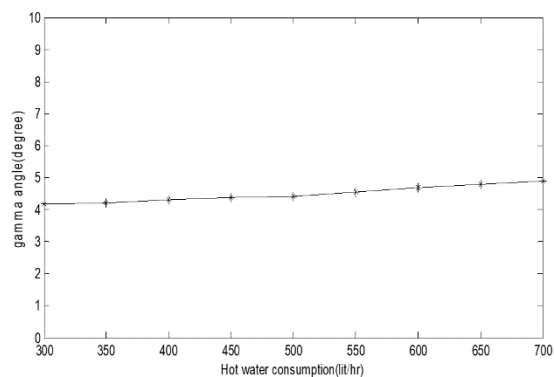
شکل ۱۰- تغییرات دمایی تانک ذخیره الف) ماه نهم ب) ماه اول در سیستم غیرمستقیم بدون مخزن تخلیه



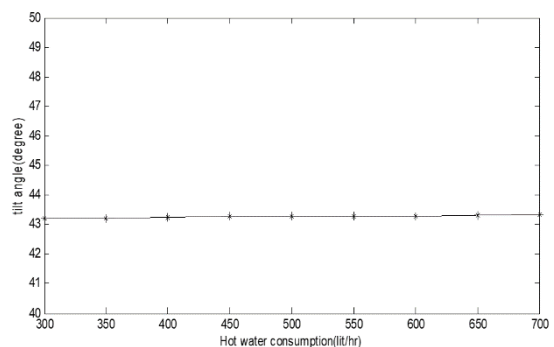
شکل ۱۳- تغییرات دمای اولیه تانک ذخیره در ماههای مختلف در سیستم غیرمستقیم

همزمان پارامترها زوایای کلکتورها پارامترهای بسیار مهمی در طراحی بهینه‌ی کلکتورها هستند که تاکنون توجه زیادی به آن‌ها نشده است. با توجه به اینکه تاکنون مطالعات زیادی روی انتخاب زوایای بهینه کلکتورها بدون توجه به مصرف آب گرم و تأثیر پارامترهای حجم و سطح کلکتورها انجام شده این نتیجه حاصل شده است که با بهینه‌سازی همزمان تا مقدار ۷٪ صرفه‌جویی انرژی نسبت به حالت دریافت حداکثری کلکتورها (بدون توجه به سیستم آبگرمکن و کلکتور تنها بررسی شده است) و تا میزان ۱۵٪ نیز صرفه‌جویی اقتصادی حاصل شده است. اهمیت بهینه‌سازی همزمان پارامترها شامل زوایای کلکتور ( $\beta$  و  $\gamma$ ) و سطح کلکتورها و حجم مخزن را نشان می‌دهد. با مقایسه-ی سیستم‌های مختلف اجباری نیز نتیجه‌گیری شده است که در بهینه‌سازی این سیستم‌ها مقدار اتلافات در جهت‌گیری و نسبت حجم مخزن به سطح کلکتور (نماینده-ی حجم مخزن ذخیره) بسیار مؤثر است. اختلاف جهت‌گیری در دو سیستم مستقیم و غیرمستقیم به ۱۵ درجه نیز می‌رسد. بنابراین می‌توان گفت که بهینه‌سازی همزمان پارامترهای طراحی در سیستم‌های مختلف گرمایش آب خورشیدی نیز ابزاری بسیار مهم برای دست یافتن به بهینه‌ترین پارامترهاست.

نکته‌ی مهم دیگر، این است که افزایش و یا کاهش مصرف (به‌طور ثابت) تأثیری در جهت‌گیری و یا زاویه شیب کلکتورها در سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی ندارد.



شکل ۱۴- تغییرات زاویه سمت صفحه با افزایش و کاهش مصرف



شکل ۱۵- تغییرات زاویه شیب کلکتور با مصرف ساعتی آب گرم

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر الگوی مصرف آب گرم بر روی پارامترهای طراحی بخصوص زوایای کلکتورها یعنی زاویه سمت صفحه ( $\gamma$ ) (جهت‌گیری کلکتور) و زاویه شیب صفحه کلکتور ( $\beta$ ) پرداخته شده است. با بررسی الگوهای مصرف مختلف این نتیجه به دست آمده است که در بهینه‌سازی

## ۶- مراجع

- [1] Chang, K.K., Minardi, A. (1980) "Optimization formulation for solar heating systems". Sol. Energy, Vol. 24, pp.99-103.
- [2] Ghoneim, A.A., Fisch, N., Ammer, A.S.A., Hahne, E. (1993). "Design of a solar water heating system for Alexandria". Egypt. Renew. Energ., Vol. 3, pp.577-583.
- [3] Shariah, A.M., Lof, G.O.G. (1996). "The optimization of tank -volume -to-collector-area ratio for a thermosyphonic solar water heater". Renew. Energ., Vol. 7(3), pp.289-300.
- [4] Krause, M., Vajen, K., Wiese, F., Ackerman, H. (2002). "Investigation on optimization large solar thermal system". Sol. Energy, Vol 73, pp.217-225.
- [5] Loomans, M., Visser, H. (2002). "Application of the Genetic algorithm for optimization of large solar hot water system". Sol. Energy, Vol. 72(5), pp.427-439.

- [6] Kalogirou, S.A. (2004). "Optimization of solar systems using artificial neural networks and genetic algorithm". *Appl. Energ.*, Vol. 77, pp.383-405.
- [7] Chow, T.T., Fong, K.F., Chan, A.L.S., Lin, Z., (2006). "Potential application of centralized solar water heating system for a high-rise residential building in Hong Kong". *Appl. Energ.*, Vol. 83, pp.42-54.
- [8] Hobbi, A., Sidiqi, K. (2009). "Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residual unit in cold climate using TRNSYS". *Sol. Energy*, Vol. 83, pp.700-714.
- [9] Braun, J.E., Klein, S.A., Mitchell, J.W. (1981). "Seasonal storage of energy in solar heating". *Sol. Energy*, Vol. 26, pp.403-411.
- [10] Michaelides, I.M., Wilson, D.R. (1996). "Optimum design criteria for solar hot water system". *Renew. Energ.*, Vol. 9(1-4), pp.649-652.
- [11] Abdel, A.M., Mohamad, M.A. (2001). "Potential of solar energy utilization in the textile industry – a case study". *Renew. Energ.*, Vol. 23, pp.685-694.
- [12] Mills, D., Morrison, G.L. (2003). "Optimization of minimum backup solar water heating system". *Sol. Energy*, Vol. 74, pp.505-511.
- [13] Zeghib, I., Chaker, A. (2011). "Simulation of a solar domestic water heating system". *Energy Procedia*, Vol. 6, pp. 292-301.
- [14] Michelson, E. (1982). "Multivariate optimization of a solar water heating system using the simplex method". *Sol. Energy*, Vol. 29, pp.89-99.
- [15] Matrawy, K.K., Farkas, I. (1997). "New technique for short term storage sizing". *Renew. Energ.* Vol. 11: pp.129-141.
- [16] Panteliou, S., Dentsoras, A., Daskalopoulos, E. (1996). "Use of expert system for the selection and the design of solar domestic hot water system". *Sol. Energ.*, Vol. 57(1), pp.57: 1-8.
- [17] Hawlader, M.N.A., Ng, K.C., Chandratilleke, I.T., Sharma, D., Koay, K.H.L. (1987). "Economic evaluation of a solar water heating system". *Energ. Convers. Manage.*, Vol. 27, pp.197-204.
- [18] Kulkarni, G.N., Kedare, A.B., Bandyopadhyay, S. (2007). "Determination of design space and optimization of solar water heating systems". *Sol. Energy*, Vol. 81, pp.958-968.
- [19] Barely, C.D., Winn, C.B. (1978). "Optimal sizing of solar collectors by the method of relative areas". *Sol. Energy*, Vol. 21, pp.279-289.
- [20] Gordon, J.M., Rabl, A. (1982). "Design analysis and optimization of industrial process heat plants without storage". *Sol. Energy*, Vol. 28, pp.519-530.
- [21] Boer, K.W. (1978). "Payback of solar system". *Sol. Energy*, Vol. 20, pp.225-232.
- [22] Kim, Y.D., Thu, K., Bhatia, H.K., Bhatia, S.C., Ng, K.C. (2012). "Thermal analysis and performance of a solar hot water plant with economic evaluation". *Sol. Energy*, Vol. 86, pp.1378-1395.
- [23] Buckels, W.E., Klein, S.A. (1980). "Analysis of solar domestic hot water heaters". *Sol. Energy*, Vol. 25, pp.417-424.
- [24] Jordan, U., Vajen, K. (2000). "Influence of the DHW load profile on the fractional energy saving: a case study of solar combi-system with TRNSYS simulation". *Proceeding of Euro-sun'2000 on Copenhagen, Denmark*.
- [25] Spur, R., Fiala, D., Nevralla, D., Probert, D. (2006). "Influence of the domestic hot-water daily draw-off profile on the performance of a hot-water store". *Appl. Energ.*, Vol. 83, pp.749-773.
- [26] Kulkarni, G.N., Kedare, S.B., Bandyopadhyay, S. (2009). "Optimization of solar ter heating system through water replenishment". *Energ. Convers. Manage.*, Vol. 50, pp.837-846.
- [27] Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1991). "Solar Engineering of Thermal Process". Second ed. Wiley, New York.
- [28] Kalogirou, S. (2009). "Solar Energy Engineering: Processes and Systems". Academic Press, Elsevier Science.
- [29] <http://www.suna.org.ir/>.
- [30] Fannee, A.H., Klein, S.A. (1988). "Thermal performance comparisons for solar hot water system subjected to various collector and heat exchanger flow rate". *Sol. Energy*, Vol. 40(1), pp.1-11.