

## مطالعه و بهینه‌سازی انرژی خورشیدی حرارتی تخت مجهز شده به بازتابنده‌ها و عدسی‌ها در یک مدار بسته با استفاده از نتایج آزمایش‌ها

حسین خراسانی‌زاده<sup>1\*</sup>، علیرضا آقایی<sup>2</sup>، حمیدرضا احترام<sup>3</sup>، آناهیتا عظیمی<sup>4</sup>

<sup>1</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

khorasan@kashanu.ac.ir

<sup>2</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

alirezaaghaei21@gmail.com

<sup>3</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

hamidreza.ehteram@yahoo.com

<sup>4</sup> کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

ana.azimi@gmail.com

دریافت مقاله: 91/9/27 اصلاحیه: 92/1/30

پذیرش مقاله: 92/4/2

**چکیده:** در این تحقیق، بر اساس داده‌های تجربی ابتدا تحلیل انرژی خورشیدی صفحه تخت در یک مدار بسته انجام شده و اثر استفاده از بازتابنده‌های بالایی، پایینی و کناری و همچنین کاربرد هم‌زمان آن‌ها با عدسی‌ها بررسی شده است، سپس بر اساس یک مدل ریاضی به بهینه‌سازی انرژی خورشیدی در همه وضعیت‌ها پرداخته شده است. بر خلاف کارهایی که تاکنون انجام شده، در مطالعه حاضر ضریب افت کلی از کلکتور ثابت فرض نشده، دمای سیال ورودی به کلکتور با دمای محیط یکسان در نظر گرفته نشده و از نتایج واقعی آزمایش‌ها استفاده شده است. بهینه‌سازی انرژی خورشیدی با بررسی تأثیر تغییر دبی و دمای سیال ورودی به کلکتور، دمای محیط، بازده اپتیکی، شار تشعشع خورشیدی ورودی و سطح کلکتور انجام شده است. نتایج نشان دادند که در کلیه وضعیت‌ها، بازده انرژی خورشیدی با افزایش شار خورشیدی و بازده اپتیکی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد. همچنین در هر وضعیت، دبی و دمای سیال ورودی بهینه‌ای وجود دارد که به ازای آن بازده انرژی خورشیدی بیشینه می‌شود. کاربرد بازتابنده‌ها به تنهایی و بازتابنده‌ها به همراه عدسی‌ها موجب بهبود بازده انرژی خورشیدی کلکتور نسبت به حالت مرجع می‌شود، اما استفاده تنها از بازتابنده‌ها از لحاظ بازده انرژی خورشیدی از سایر وضعیت‌ها بهتر است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، انرژی خورشیدی، بهینه‌سازی، بازتابنده و عدسی، کلکتور خورشیدی صفحه تخت.

## 1. مقدمه

مشکل کرده است. این در شرایطی است که در مفهوم بازده انرژی اثرگذاری متغیرها بهتر مشخص می‌شود [6].

دوتاگوپتا و سابا [7] تحلیل انرژی یک کلکتور را برای پیدا کردن دمای ورودی بهینه با فرض ثابت بودن ضریب کلی افت حرارت انجام دادند. هال و همکاران [8] به تحلیل انرژی دریافت‌کننده‌های خورشیدی فضایی، با این فرض که ضریب کلی افت حرارت تابع توانی از دمای متوسط سطح بیرونی باشد، پرداختند. ماهانتا و کومار [9] به بهینه‌سازی ترمودینامیکی کلکتورهای صفحه تخت بر اساس کمینه کردن انرژی تولید شده پرداختند. تورس ریز و همکاران [10] با استفاده از روابط بی‌بعد دمای بهینه سیال و طول مسیر بهینه جریان سیال را برای یک کلکتور صفحه تخت هوایی یافتند. فراخت و همکاران [11] درباره موضوع بهینه‌سازی انرژی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت مطالعه کردند. کار ایشان و بیشتر مطالعه‌های قبلی با فرض ثابت بودن ضریب کلی افت حرارت کلکتور انجام شده و همچنین تحلیل انرژی کلکتور با فرض برابر بودن دمای سیال ورودی به کلکتور با دمای محیط در یک مدار باز صورت گرفته است. در مطالعه حاضر به تحلیل انرژی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت در یک مدار بسته در سه وضعیت کلکتور مرجع، کلکتور همراه با بازتابنده‌ها و کلکتور همراه با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها مبتنی بر داده‌های تجربی به دست آمده، از آزمایش‌های انجام شده در شهر تهران پرداخته شده است. روابطی برای مؤلفه‌های مختلف معادله تعادل انرژی کلکتور توسعه داده شده و معادله بازده انرژی کلکتور توسط این روابط به دست آمده است. در تحلیل حاضر بر خلاف مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، دمای سیال ورودی به کلکتور با دمای محیط یکسان فرض نشده و همچنین ضریب افت کلی کلکتور نیز متغیر در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی کلکتور از دیدگاه تحلیل انرژی با تغییر متغیرهایی مانند دما و دبی سیال ورودی به کلکتور، دمای محیط، بازده اپتیکی، شار تشعشعی خورشیدی و سطح کلکتور با کمک یک برنامه کامپیوتری نوشته شده در محیط فرترن انجام شده است.

## 2. مدل‌سازی انرژی

در این بخش، روابط مربوط به تحلیل انرژی کلکتور صفحه تخت ارائه می‌شوند. در شکل (1) نمایی مربوط به قسمتی از کلکتور صفحه لوله‌ای مورد بررسی در این مطالعه نشان داده شده است.

کلکتورهای صفحه تخت، جذب‌کننده‌های انرژی خورشیدی هستند که در آن‌ها انرژی تشعشعی خورشیدی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های این کلکتورها توانایی جذب تشعشع پخش شده و مستقیم به طور هم‌زمان است. از جمله مزایای دیگر این کلکتورها عدم نیاز به دنبال کردن خورشید، نگهداری و تعمیرات آسان آن‌ها می‌باشد. با به کارگیری بازتابنده‌ها می‌توان مقداری از تشعشع خورشیدی را که از اطراف کلکتور به سطح زمین فرار می‌کند، به روی سطح کلکتور منعکس کرد. با استفاده از عدسی‌ها نیز می‌توان بخش بیشتری از تشعشع پخش شده را متمرکز کرد. در برخی از مطالعه‌های مربوط به کلکتورها فقط به بررسی اثر بازتابنده‌های بالایی و پایینی پرداخته شده است و تاکنون گزارشی از مطالعه مربوط به استفاده از عدسی‌ها به صورت مقاله منتشر نشده است. مک‌دانیل و لاوندس [1] نشان دادند که استفاده از بازتابنده‌های بالایی و پایینی، راهی ارزان و کارآمد برای افزایش تشعشع خورشیدی برخوردی به روی صفحه جذب به شمار می‌رود. بیکر و همکاران [2] با انجام مطالعه عددی نشان دادند در صورتی که کلکتورها در شبی بیشتر از عرض جغرافیایی محل قرار گیرند، با قرار دادن سطحی برای بازتاب تشعشع در پایین کلکتور عملکرد کلکتور در تابستان بهبود می‌یابد. پوکار و دسپیک [3] نشان دادند که هرگاه از بازتابنده با زاویه ثابت در بالای کلکتور استفاده شود، تنها در بازه زمانی کوتاهی سطح کلکتور به صورت یکنواخت تشعشع بازتابیده را دریافت می‌کند و در بقیه زمان‌ها قسمتی از تشعشع بازتابیده از روی سطح کلکتور به سمت زمین فرار می‌کند و هدر می‌رود. عظیمی [4] در یک مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی، آثار استفاده از بازتابنده‌های تخت در چهار طرف کلکتور و همچنین عدسی‌ها را بر روی عملکرد کلکتور صفحه تخت خورشیدی بررسی کرد. او نشان داد که کاربرد بازتابنده‌های بالایی و پایینی با زاویه ثابت و بازتابنده‌های کناری با تنظیم زاویه، موجب افزایش بازده انرژی می‌شود و فقط موقعی که استفاده از بازتابنده‌های کناری به دلیل نیاز به تغییر زاویه مشکل باشد، استفاده از عدسی‌ها توجیه دارد.

انرژی یکی از مفاهیم مهم قانون دوم ترمودینامیک است که از نظر تئوری، شامل حداکثر کار مفیدی است که از یک جریان ماده و یا انرژی قابل حصول است [5]. عملکرد حرارتی بهینه کلکتور در کارکرد آن تأثیر زیادی دارد، لذا مقدار کیفیت انرژی یا همان انرژی کلکتور اهمیت پیدا می‌کند. دشوار بودن تعیین اثر متغیرهای مختلف بر بازده انرژی کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، طراحی آن‌ها را

لوله‌ها و  $F$  بازده پایه پره است [12]. در حالت پایدار، انرژی مفید دریافتی به وسیله کلکتور عبارت است از [12]:

$$Q_u = A_c S - U_l A_c (T_p - T_a) \quad (7)$$

$T_p$  دمای صفحه جاذب و  $U_l$  افت کلی از کلکتور است.  $U_l$  برابر مجموع افت از سمت بالای صفحه جاذب به محیط،  $U_i$ ، افت از پشت کلکتور،  $U_b$ ، و افت از اطراف آن،  $U_e$ ، می‌باشد و عبارت است از [12]:

$$U_l = U_T + U_b + U_e \quad (8)$$

بازده انرژی تحلیلی و تجربی کلکتور به ترتیب عبارت‌اند از [12]:

$$\eta_{en_{cal}} = (\tau\alpha) - \frac{U_l(T_p - T_a)}{I_T} \quad (9)$$

$$\eta_{en_{exp}} = \frac{\dot{m}c_p(T_{out} - T_{in})}{I_T \times A_p} \quad (10)$$

### 3. مدل‌سازی انرژی

انرژی طبق تعریف، عبارت است از بیشترین مقدار کار قابل حصول از یک جریان سیال یا منبع انرژی، موقعی که از یک حالت معین به تعادل با محیط برسد [5]. معادله نرخ انرژی مانند سایر معادلات بقا قابل بیان بوده و عبارت است از [13]:

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} - \sum \dot{E}_{loss} - \sum \dot{E}_{des} = \dot{E}_s \quad (11)$$

$\dot{E}_s$  معرف نرخ انرژی ذخیره شده است و با فرض اینکه کلکتور در حالت پایدار عمل کند، برابر صفر است. نرخ انرژی ورودی،  $\sum \dot{E}_{in}$ ، شامل نرخ انرژی ورودی به وسیله جریان سیال،  $\dot{E}_{in,f}$ ، و نرخ انرژی مربوط به تشعشع خورشیدی جذب شده،  $\dot{E}_{in,Q}$ ، می‌باشد. نرخ انرژی ورودی به وسیله جریان سیال عبارت است از [13]:

$$\dot{E}_{in,f} = \dot{m}c_p \left( T_{in} - T_a - T_a \ln \left( \frac{T_{in}}{T_a} \right) \right) + \frac{\dot{m}\Delta P_{in}}{\rho} \quad (12)$$

$\Delta P_{in}$  اختلاف فشار سیال ورودی با فشار محیط و  $T_a$  دمای محیط است. نرخ انرژی ورودی مربوط به تشعشع خورشیدی جذب شده عبارت است از [13]:

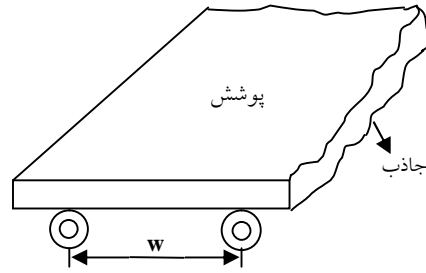
$$\dot{E}_{in,Q} = \eta_o I_T A_c \left( 1 - \frac{T_a}{T_s} \right) \quad (13)$$

دمای خورشید با فرض اینکه جسم سیاه لحاظ شود، 5777 K می‌باشد. با توجه به اثر اتمسفر زمین در تضعیف تشعشع خورشیدی  $T_s$  در رابطه (13)، که معروف به دمای ظاهری خورشید است، به طور تقریبی برابر 75% دمای خورشید یعنی 4333 K در نظر گرفته می‌شود [14].

نرخ انرژی خروجی  $\sum \dot{E}_{out}$  برابر نرخ انرژی خروجی به وسیله جریان سیال،  $\dot{E}_{out,f}$ ، بوده و عبارت است از [5]:

$$\dot{E}_{out,f} = \dot{m}c_p \left( T_{out} - T_a - T_a \ln \left( \frac{T_{out}}{T_a} \right) \right) + \frac{\dot{m}\Delta P_{out}}{\rho} \quad (14)$$

$\Delta P_{out}$  اختلاف فشار سیال خروجی با فشار محیط است.



شکل (1): نمایی جزئی از کلکتور صفحه لوله‌ای تخت

انرژی مفید کسب شده توسط سیال عبوری از کلکتور عبارت است از [12]:

$$Q_u = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$\dot{m}$  دبی سیال،  $c_p$  گرمای ویژه فشار ثابت سیال و  $T_{in}$  و  $T_{out}$  به ترتیب دمای سیال خروجی از کلکتور و ورودی به آن می‌باشند. انرژی مفید کسب شده توسط کلکتور بر حسب مقدار تشعشع خورشیدی ورودی و تلفات حرارتی از بدنه کلکتور عبارت است از [12]:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_l(T_{in} - T_a)] \quad (2)$$

$A_c$  سطح جاذب کلکتور،  $T_a$  دمای محیط و  $S$  بخشی از تشعشع خورشیدی بر واحد سطح جاذب کلکتور است که توسط آن جذب می‌شود.  $S$  از رابطه زیر به دست می‌آید [12]:

$$S = (\tau\alpha)I_T = \eta_o I_T \quad (3)$$

$I_T$  شار تشعشعی خورشیدی وارد شده به کلکتور و  $\eta_o$  بازده اپتیکی بوده و برابر حاصل ضرب مؤثر عبور- جذب است که از رابطه زیر به دست می‌آید [12]:

$$\eta_o = (\tau\alpha) = 1.01\tau\alpha \quad (4)$$

$F_R$  در رابطه (2) ضریب انتقال گرمای کلکتور بوده و عبارت است از نسبت انرژی مفید واقعی به دست آمده به انرژی مفید در شرایطی که همه سطح کلکتور در دمای سیال ورودی باشد و با رابطه زیر بیان می‌شود [12]:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p}{A_c U_l} \left( 1 - \exp \left( - \frac{F' U_l A_c}{\dot{m}c_p} \right) \right) \quad (5)$$

$F'$  ضریب بازده کلکتور بوده و معرف نسبت مقاومت حرارتی از صفحه جاذب به محیط به مقاومت حرارتی از سیال به محیط است [12]:

$$F' = \frac{1/U_l}{W \left[ \frac{1}{U_l(D+(W-D)F)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_{fi}} \right]} \quad (6)$$

$\frac{1}{C_b}$  مقاومت هدایتی ماده اتصال دهنده لوله‌ها به صفحه جاذب است و اغلب مقدار بسیار ناچیزی دارد.  $W$  فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها و  $D$  قطر لوله‌ها می‌باشد.  $h_{fi}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال داخل

$$T_{out}-T_a = \frac{S}{U_l} + \left(T_{in}-T_a - \frac{S}{U_l}\right) \exp[-(U_l A_c F)/\dot{m}c_p] \quad (22)$$

در نهایت، با جایگزینی  $T_{out}$  از معادله (22) در معادله (21) بازده اگزورژی عبارت است از:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}}{A_c I_T \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \left\{ c_p \left(T_a + \frac{S}{U_l} + \left(T_{in}-T_a - \frac{S}{U_l}\right) \exp[-(U_l A_c F)/\dot{m}c_p] - T_{in} - T_a \ln\left(\frac{T_a}{T_{in}} + \frac{\frac{S}{U_l T_{in}} + \left(1 - \frac{T_a}{T_{in}} - \frac{S}{U_l T_{in}}\right)}{\exp[-(U_l A_c F)/\dot{m}c_p]}\right) \right\} + \frac{\Delta P}{\rho} \quad (23)$$

#### 4. مشخصات سیستم و شرح آزمایش‌ها

نمایی از سیستمی که کلکتور در آن نصب شده در شکل (2-الف) نشان داده شده است و همچنین مشخصات کلکتور مرجع و تجهیزات مربوط به بازتابنده‌ها و عدسی‌ها که در آزمایش‌ها از آن‌ها استفاده شده، در جدول (1) آورده شده است. آزمایش‌ها در شهر تهران با عرض جغرافیایی  $35^{\circ}41'$  و طول جغرافیایی  $51^{\circ}25'$  انجام شده‌اند. در آزمایش‌های انجام‌شده شیب کلکتور برابر  $35^{\circ}$  به سمت جنوب، یعنی زاویه شیب برای بیشترین بازده سالیانه بوده است. دبی عبوری گذرنده از کلکتور بر واحد سطح آن برابر  $0/03 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$  بوده که نسبت به دبی در کلکتورهای تخت معمول، مقدار زیادی است. این دبی به دلیل وارد شدن انرژی بیشتر به کلکتور ناشی از کاربرد بازتابنده‌ها انتخاب شده است. به جز هنگام استفاده از تجهیزاتی مانند بازتابنده‌ها و عدسی‌ها، تمام اجزای دیگر سیستم در همه آزمایش‌ها ثابت بوده‌اند. مرحله اول آزمایش‌ها با کلکتور بدون استفاده از بازتابنده‌ها و عدسی‌ها انجام شده‌اند. در مرحله دوم از بازتابنده‌ها در بالا، پایین و طرفین کلکتور مطابق شکل (2-ب) استفاده شده است. در این مرحله، بازتابنده بالایی به صورت ثابت و عمود نسبت به افق و بازتابنده پایینی با زاویه  $35^{\circ}$  نسبت به افق نصب شده‌اند، ولی زاویه بازتابنده‌های کناری در هر نیم ساعت به میزان  $5/8^{\circ}$  تغییر داده شده است. علت استفاده از بازتابنده‌های کناری با ابعاد کم، جلوگیری از سایه‌اندازی آن‌ها بر روی کلکتور بوده است. موضوع سایه‌اندازی در تنظیم زاویه این بازتابنده‌ها در شروع اندازه‌گیری‌ها در ساعت 9 صبح نیز رعایت شده است. در مرحله آخر از آزمایش‌ها از کلکتور به همراه بازتابنده‌ها با شرایط مرحله دوم به اضافه عدسی‌ها مطابق شکل (2-ج) استفاده شده است.

نرخ اگزورژی هدر رفته،  $\sum \dot{E}_{loss}$ ، شامل نرخ اتلاف از صفحه جاذب به محیط و نرخ اتلاف اپتیکی می‌باشد. نرخ اتلاف اگزورژی از صفحه جاذب به محیط،  $\dot{E}_{l,p}$ ، عبارت است از [7]:

$$\dot{E}_{l,p} = U_l A_c (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p}\right) \quad (15)$$

بخشی از تشعشع خورشیدی به دلیل خصوصیات اپتیکی صفحه جاذب، جذب نمی‌شود. نرخ اتلاف اپتیکی اگزورژی عبارت است از [15]:

$$\dot{E}_{l,optical} = \frac{(1-\eta_o)\dot{E}_{in,r}}{\dot{E}_{in,r}} = (1-\eta_o) \quad (16)$$

نرخ نبود شدن اگزورژی،  $\sum \dot{E}_{des}$ ، شامل اتلاف اگزورژی به دلیل اختلاف دما بین صفحه جاذب و خورشید، اتلاف اگزورژی ناشی از اختلاف دمای صفحه جاذب و سیال گذرنده از کلکتور و اتلاف اگزورژی به دلیل افت فشار در کلکتور است. اتلاف اگزورژی در اثر اختلاف دما بین صفحه جاذب و خورشید،  $\dot{E}_{d,\Delta T_{p-s}}$ ، عبارت است از [13]:

$$\dot{E}_{d,\Delta T_{p-s}} = \eta_o I_T A_c T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s}\right) \quad (17)$$

اتلاف اگزورژی به دلیل اختلاف دمای صفحه جاذب و سیال گذرنده از کلکتور،  $\dot{E}_{d,\Delta T_f}$ ، عبارت است از [13]:

$$\dot{E}_{d,\Delta T_f} = \dot{m}c_p T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) - \dot{m}c_p T_a \frac{T_{out}-T_{in}}{T_p} \quad (18)$$

اتلاف اگزورژی ناشی از افت فشار به دلیل لزجت سیال عبارت است از [13]:

$$\dot{E}_{d,\Delta P} = \frac{\dot{m}\Delta P T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right)}{\rho (T_{out}-T_{in})} \quad (19)$$

بازده اگزورژی کلکتور خورشیدی صفحه تخت به صورت نسبت افزایش اگزورژی جریان سیال داخل کلکتور به اگزورژی تشعشع خورشیدی ورودی به کلکتور تعریف می‌شود و عبارت است از [6]:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{out,f} - \dot{E}_{in,f}}{I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \quad (20)$$

بازده اگزورژی با قرار دادن روابط (12) تا (19) در رابطه (20) به صورت رابطه (21) بیان می‌شود:

$$\eta_{ex} = 1 - \left( (1-\eta_o) + \frac{U_l(T_p-T_a)}{I_T \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \left(1 - \frac{T_a}{T_p}\right) + \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \frac{T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right)}{T_{out}-T_{in}} + \frac{\eta_o T_a}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s}\right) + \frac{\dot{m}c_p T_a \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) - \frac{T_{out}-T_{in}}{T_p}}{I_T A_c \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \right) \quad (21)$$

همچنین رابطه بین دمای سیال خروجی از کلکتور و دیگر متغیرها عبارت است از [12]:

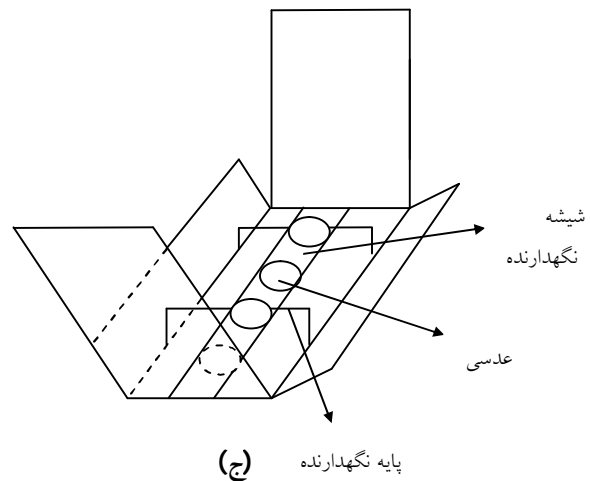
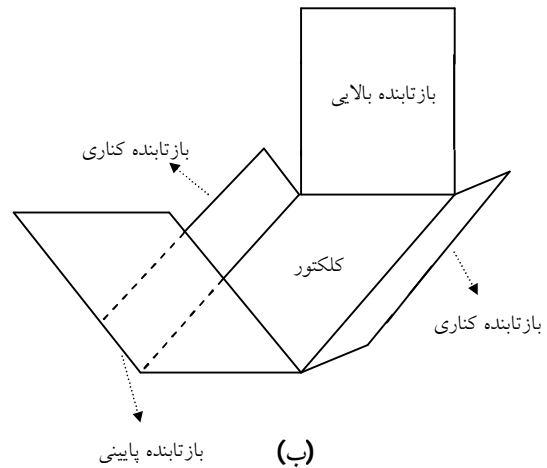
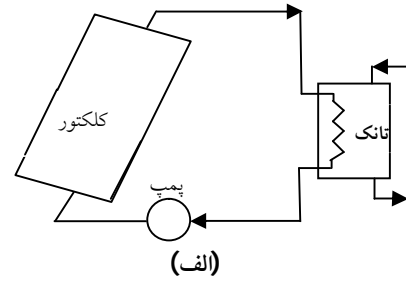
مربوط به اندازه‌گیری‌های سازمان هواشناسی استفاده شده است. با توجه به اینکه تنها از یک کلکتور برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده، هر مرحله از آزمایش‌ها به صورت مجزا در یک روز کامل انجام شده است. با وجود این، روزهای مربوط به سه مرحله از انجام آزمایش‌ها در تابستان 1390 نزدیک به هم و از لحاظ وضعیت تشعشعی و آب و هوایی مشابه بوده‌اند. در هر مرحله، اندازه‌گیری‌ها و ثبت داده‌ها از ساعت 9 صبح تا ساعت 16 عصر و هر نیم ساعت انجام شده‌اند.

جدول (1): مشخصات کلکتور، بازتابنده‌ها و عدسی‌ها در آزمایش‌ها

| مشخصات                  | مورد                                |
|-------------------------|-------------------------------------|
| صفحه لوله‌ای            | نوع کلکتور                          |
| آلومینیوم               | جنس صفحه                            |
| رنگ سیاه مات            | جنس پوشش صفحه                       |
| 0/001m                  | ضخامت صفحه                          |
| 0/9                     | ضریب صدور صفحه ( $\epsilon_p$ )     |
| $211W.m^{-1}.K^{-1}$    | ضریب هدایت حرارتی صفحه ( $k_p$ )    |
| $2 \times 0/925$ m      | ابعاد کلکتور                        |
| $35^\circ$              | شیب قرارگیری کلکتور ( $\beta$ )     |
| یک                      | تعداد پوشش شیشه‌ای                  |
| 0/85                    | ضریب صدور پوشش ( $\epsilon_g$ )     |
| 1/5 cm                  | قطر لوله‌ها                         |
| 0/115 m                 | فاصله مرکز تا مرکز لوله‌ها (W)      |
| ناچیز                   | $1/c_p$ مربوط به محل اتصال لوله‌ها  |
| 0/95                    | ضریب بازده ( $F'$ )                 |
| 0/68                    | بازده اپتیک ( $\eta_o$ )            |
| 0/02 m                  | ضخامت عایق اطراف                    |
| 0/02 m                  | ضخامت عایق پشت                      |
| $0/05 W.m^{-1}.K^{-1}$  | ضریب هدایت حرارتی عایق‌ها ( $k_i$ ) |
| آب                      | سیال عامل                           |
| $4200 J.kg^{-1}.K^{-1}$ | $c_p$ سیال عامل                     |
| 0/001 Pa                | افت فشار سیال                       |
| استیل 304               | جنس بازتابنده‌ها                    |
| 4                       | تعداد بازتابنده‌ها                  |
| $1 \times 2$ m          | ابعاد بازتابنده بالایی و پایینی     |
| $2 \times 0/3$ m        | ابعاد بازتابنده‌های کناری           |
| همگرای دوکوز            | نوع عدسی‌ها                         |
| 40                      | تعداد عدسی‌های استفاده شده          |

## 5. نتایج و بحث

در قسمت‌های بعد و به ترتیب، ابتدا نتایج تحلیل انرژی که با تکیه بر اندازه‌گیری‌های انجام شده در آزمایش‌ها به دست آمده‌اند، بحث می‌شوند، سپس به تحلیل انرژی سیستم موجود در تمامی مراحل آزمایش‌ها پرداخته و در آخر، نتایج بهینه‌سازی انرژی ارائه می‌شود.



شکل (2): الف) نمایی کلی از سیستم شامل کلکتور؛ ب) کلکتور با بازتابنده‌ها؛ ج) کلکتور با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها

عدسی‌ها از نوع همگرای دو کوز و دارای قطر 10 cm و نقطه کانونی 15 cm با لبه‌های نازک‌تر از ناحیه وسط بوده‌اند. برای قرار دادن عدسی‌ها از 5 ردیف شیشه هر کدام با عرض 10 cm و طول 2 متر به عنوان تکیه‌گاه استفاده شده است و به دلیل طول زیاد شیشه‌ها و احتمال شکستگی آن‌ها پایه‌هایی شیشه‌ای برای آن‌ها قرار داده شده است. تشعشع خورشیدی ورودی به صفحه جذب به وسیله سولاریمتری با دقت 1W که همیشه با شیبی برابر با شیب کلکتور و در گوشه بالایی و سمت چپ آن قرار داده شده، اندازه‌گیری شده است. دماها به کمک دماسنج‌هایی با دقت  $0/1^\circ C$  اندازه‌گیری شده‌اند. برای مقادیر سرعت باد از گزارش‌های

### 1.5. تحلیل انرژی

در جدول‌های (2) تا (4) نتایج اندازه‌گیری‌ها در آزمایش‌های انجام شده مربوط به هر سه وضعیت استفاده از کلکتور در شرایط مرجع، با بازتابنده‌ها و با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها آورده شده‌اند.

جدول (4): نتایج اندازه‌گیری‌ها برای کلکتور با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها

| زمان  | $I_T$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $T_a$<br>(°C) | $T_{in}$<br>(°C) | $T_p$<br>(°C) | $T_{o,exp}$<br>(°C) | $V_w$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|
| 9:00  | 650                           | 32            | 44               | 50            | 46                  | 1                             |
| 9:30  | 720                           | 32            | 45               | 51            | 47/5                | 1                             |
| 10:00 | 880                           | 32            | 47               | 52/5          | 50                  | 2                             |
| 10:30 | 1010                          | 32            | 49               | 55/3          | 52/5                | 4                             |
| 11:00 | 1020                          | 33            | 51               | 57/2          | 54/5                | 3                             |
| 11:30 | 1160                          | 34            | 52/5             | 59            | 56/5                | 3                             |
| 12:00 | 1260                          | 35            | 54               | 62            | 58/5                | 5                             |
| 12:30 | 1330                          | 37            | 55               | 63/1          | 59/5                | 6                             |
| 13:00 | 1370                          | 38            | 56               | 65            | 61                  | 5                             |
| 13:30 | 1370                          | 39            | 58               | 66            | 62/5                | 6                             |
| 14:00 | 1290                          | 39            | 59               | 67/2          | 63/5                | 5                             |
| 14:30 | 1190                          | 39            | 60               | 67            | 64                  | 4                             |
| 15:00 | 1050                          | 39            | 61               | 68            | 64                  | 7                             |
| 15:30 | 950                           | 40            | 62               | 69            | 64/5                | 6                             |
| 16:00 | 860                           | 40            | 63               | 69/5          | 65/5                | 4                             |

بازده انرژی تجربی و تحلیلی در ساعت‌های مختلف، با توجه به نتایج ارائه شده در جدول‌های (2) تا (4) محاسبه و در جدول‌های (5) تا (7) ارائه شده‌اند. برای وضعیت استفاده از بازتابنده‌ها نسبت به شرایط مرجع، بازده در همه ساعت‌ها افزایش یافته است. اما در وضعیت استفاده از عدسی‌ها با بازتابنده‌ها، نگره‌دارنده عدسی‌ها مانع ورود بخشی از تشعشع و رسیدن آن به صفحه جذب شده است، لذا نسبت به وضعیت استفاده تنها از بازتابنده‌ها کاهش بازده رخ می‌دهد.

جدول (5): بازده انرژی تجربی و تحلیلی برای وضعیت کلکتور مرجع (%)

| زمان  | $\eta_{en,cal}$ | $\eta_{en,exp}$ |
|-------|-----------------|-----------------|
| 9:00  | 43/99           | 12/16           |
| 9:30  | 45/26           | 21/62           |
| 10:00 | 48/15           | 27/24           |
| 10:30 | 49/54           | 32/82           |
| 11:00 | 50/40           | 36/82           |
| 11:30 | 50/14           | 41/2            |
| 12:00 | 50/33           | 47/4            |
| 12:30 | 49/63           | 46/74           |
| 13:00 | 49/18           | 48/74           |
| 13:30 | 47/37           | 52/16           |
| 14:00 | 44/25           | 40/84           |
| 14:30 | 43/31           | 34/92           |
| 15:00 | 39/27           | 27/84           |
| 15:30 | 34/4            | 32/64           |
| 16:00 | 31/35           | 11/22           |

جدول (2): نتایج اندازه‌گیری‌ها در وضعیت کلکتور مرجع

| زمان  | $I_T$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $T_a$<br>(°C) | $T_{in}$<br>(°C) | $T_p$<br>(°C) | $T_{o,exp}$<br>(°C) | $V_w$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|
| 9:00  | 560                           | 33            | 44/5             | 50            | 45                  | 6                             |
| 9:30  | 630                           | 33            | 45               | 51            | 46                  | 6                             |
| 10:00 | 750                           | 34            | 46               | 53            | 47/5                | 5                             |
| 10:30 | 830                           | 35            | 47               | 54            | 49                  | 6                             |
| 11:00 | 925                           | 36            | 50               | 56            | 52/5                | 6                             |
| 11:30 | 992                           | 37            | 51               | 59            | 54                  | 5                             |
| 12:00 | 1006                          | 38            | 53               | 60            | 56/5                | 5                             |
| 12:30 | 1020                          | 38/5          | 54               | 61            | 57/5                | 6                             |
| 13:00 | 978                           | 40/5          | 56               | 62/5          | 59/5                | 6                             |
| 13:30 | 914                           | 40/5          | 57               | 63/5          | 60/5                | 5                             |
| 14:00 | 834                           | 41            | 60               | 65            | 62/5                | 5                             |
| 14:30 | 780                           | 41            | 61               | 65            | 63                  | 4                             |
| 15:00 | 734                           | 39/5          | 62               | 65            | 63/5                | 5                             |
| 15:30 | 626                           | 41            | 63               | 66            | 64/5                | 6                             |
| 16:00 | 607                           | 41            | 64               | 67            | 64/5                | 6                             |

همان‌طور که از مقایسه مقادیر تشعشع کل اندازه‌گیری شده در جدول‌ها دیده می‌شود، استفاده از بازتابنده‌ها در وضعیت‌های دوم و سوم باعث افزایش تشعشع ورودی شده است. این افزایش برای وضعیت استفاده تنها از بازتابنده‌ها در بعضی مواقع روز نسبت به شرایط مرجع حدود 70% است. دمای سیال ورودی به کلکتور که از منبع ذخیره گرفته شده، به دلیل عملکرد کلکتور در یک مدار بسته و ذخیره‌سازی گرما در منبع مدام افزایش یافته است.

جدول (3): نتایج اندازه‌گیری‌ها در وضعیت کلکتور با بازتابنده‌ها

| زمان  | $I_T$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $T_a$<br>(°C) | $T_{in}$<br>(°C) | $T_p$<br>(°C) | $T_{o,exp}$<br>(°C) | $V_w$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) |
|-------|-------------------------------|---------------|------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|
| 9:00  | 690                           | 32            | 47               | 51            | 48                  | 4                             |
| 9:30  | 780                           | 32            | 49               | 52            | 50/5                | 3                             |
| 10:00 | 855                           | 33            | 51               | 54/5          | 53/5                | 5                             |
| 10:30 | 945                           | 33            | 52               | 58            | 55                  | 3                             |
| 11:00 | 1050                          | 34            | 55               | 60            | 58/5                | 3                             |
| 11:30 | 1206                          | 35            | 57               | 62/6          | 61                  | 4                             |
| 12:00 | 1226                          | 36            | 59               | 67/2          | 63/5                | 3                             |
| 12:30 | 1736                          | 36            | 60/5             | 71            | 66/5                | 5                             |
| 13:00 | 1383                          | 38            | 62/5             | 71            | 67/5                | 4                             |
| 13:30 | 1226                          | 38            | 64               | 71/2          | 69                  | 2                             |
| 14:00 | 1134                          | 38            | 66               | 72            | 70                  | 4                             |
| 14:30 | 1040                          | 39            | 67/5             | 73            | 70/5                | 3                             |
| 15:00 | 928                           | 39            | 68               | 71/7          | 70/5                | 4                             |
| 15:30 | 915                           | 40            | 68/5             | 72            | 71                  | 5                             |
| 16:00 | 800                           | 39            | 69               | 72/5          | 71                  | 2                             |

در جدول (8) بیشینه بازده انرژی تجربی برای هر سه وضعیت مختلف و زمان وقوع آن ارائه شده است. همانطور که دیده می شود استفاده تنها از بازتابنده‌ها بیشترین بازده را موجب شده است.

جدول (8): بیشینه بازده انرژی تجربی برای سه وضعیت مختلف

| سیستم                            | $\eta_{en,exp}$ (%) | ساعت  |
|----------------------------------|---------------------|-------|
| کلکتور مرجع                      | 52/16               | 13/30 |
| کلکتور با بازتابنده‌ها           | 55/56               | 13/30 |
| کلکتور با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها | 49/72               | 13    |

## 2.5. تحلیل و بهینه‌سازی انرژی

در این قسمت، ابتدا تحلیل انرژی کلکتور در آزمایش‌های انجام شده در سه وضعیت مختلف ارائه می شود و سپس به موضوع بهینه‌سازی پرداخته می شود. در تحلیل انرژی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی باد، از مقادیر سرعت باد ارائه شده در جدول‌های (2) تا (4) استفاده شده است. در جدول‌های (9) تا (11) نتایج محاسبات مربوط به بازده تجربی و تحلیلی انرژی، دمای خروجی از کلکتور و ضریب کلی افت از کلکتور به ترتیب مربوط به وضعیت استفاده از کلکتور در شرایط مرجع، همراه با بازتابنده‌ها و همراه با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها ارائه شده‌اند. مقادیر بازده تجربی مبتنی بر نتایج حاصل از آزمایش‌هاست، ولی بازده تحلیلی بر مبنای دمای خروجی محاسبه شده از رابطه (22) به دست آمده است.

جدول (9): بازده انرژی تجربی و تحلیلی،

دمای خروجی و ضریب کلی افت کلکتور مرجع

| زمان  | $U_l$<br>( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) | $T_{0,cal}$<br>( $^{\circ}C$ ) | $\eta_{ex,cal}$<br>(%) | $\eta_{ex,exp}$<br>(%) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| 9:00  | 7/908                          | 46/62                          | 1/811                  | 2/30                   |
| 9:30  | 7/959                          | 47/44                          | 1/962                  | 2/353                  |
| 10:00 | 7/836                          | 49/05                          | 2/132                  | 2/519                  |
| 10:30 | 8/065                          | 50/42                          | 2/230                  | 2/521                  |
| 11:00 | 8/142                          | 53/77                          | 2/638                  | 2/792                  |
| 11:30 | 8/053                          | 55/11                          | 2/618                  | 2/811                  |
| 12:00 | 8/082                          | 57/12                          | 2/797                  | 2/873                  |
| 12:30 | 8/330                          | 58/13                          | 2/830                  | 2/905                  |
| 13:00 | 8/366                          | 59/91                          | 2/776                  | 2/822                  |
| 13:30 | 8/196                          | 60/56                          | 2/787                  | 2/794                  |
| 14:00 | 8/253                          | 63                             | 2/910                  | 2/961                  |
| 14:30 | 8/025                          | 63/71                          | 2/967                  | 3/023                  |
| 15:00 | 8/271                          | 64/29                          | 2/974                  | 3/018                  |
| 15:30 | 8/514                          | 64/73                          | 2/471                  | 2/490                  |
| 16:00 | 8/557                          | 65/58                          | 2/369                  | 2/498                  |

جدول (6): بازده انرژی تجربی و تحلیلی برای وضعیت کلکتور با

بازتابنده‌ها (%)

| زمان  | $\eta_{en,cal}$ | $\eta_{en,exp}$ |
|-------|-----------------|-----------------|
| 9:00  | 47/14           | 19/74           |
| 9:30  | 49/06           | 26/2            |
| 10:00 | 48/08           | 39/82           |
| 10:30 | 47/90           | 43/24           |
| 11:00 | 49/03           | 45/4            |
| 11:30 | 49/70           | 45/18           |
| 12:00 | 47/93           | 50              |
| 12:30 | 50/82           | 47/08           |
| 13:00 | 48/27           | 49/24           |
| 13:30 | 47/19           | 55/56           |
| 14:00 | 43/11           | 48/04           |
| 14:30 | 41/65           | 39/3            |
| 15:00 | 38/80           | 36/7            |
| 15:30 | 38/15           | 37/22           |
| 16:00 | 35/66           | 34/06           |

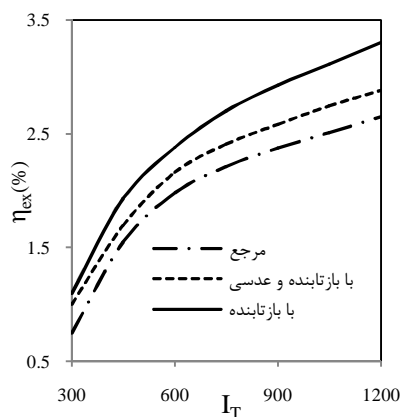
در همه وضعیت‌ها نرخ تشعشع ورودی از صبح تا ساعت‌های میان روز افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بازده انرژی نیز رفتار مشابهی نشان می‌دهد. با وجود این، دلیل کاهش بازده انرژی در ساعت‌های بعدازظهر، افزایش دمای سیال ورودی و همچنین افزایش دمای صفحه جذب با گذشت زمان است که باعث تشدید افت‌ها شده‌اند.

جدول (7): بازده انرژی تجربی و تحلیلی

برای وضعیت کلکتور با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها (%)

| زمان  | $\eta_{en,cal}$ | $\eta_{en,exp}$ |
|-------|-----------------|-----------------|
| 9:00  | 49/52           | 41/9            |
| 9:30  | 50/31           | 47/3            |
| 10:00 | 49/27           | 46/44           |
| 10:30 | 50/15           | 47/2            |
| 11:00 | 50/04           | 46/74           |
| 11:30 | 51/57           | 46/98           |
| 12:00 | 50/42           | 48/64           |
| 12:30 | 51/43           | 46/08           |
| 13:00 | 51/67           | 49/72           |
| 13:30 | 51/17           | 44/74           |
| 14:00 | 49/72           | 47/52           |
| 14:30 | 48/89           | 45/78           |
| 15:00 | 43/58           | 38/92           |
| 15:30 | 41/60           | 35/84           |
| 16:00 | 39/86           | 39/6            |

آگزرژی تجربی و تحلیلی مربوط به ساعت 9 صبح است. هم بازده انرژی و هم بازده آگزرژی وابسته به مقدار  $I_T$  و زاویه تابش هستند. در ساعت 9 صبح علاوه بر کمتر بودن  $I_T$  زاویه بین راستای تشعشع مستقیم خورشیدی و عمود بر سطح کلکتور بیشتر است و به همین دلیل، جذب تشعشع خورشیدی کمتر می‌شود. همچنین عملکرد کلکتور به دلیل تغییر  $I_T$  و تغییر زاویه تابش و همچنین تغییر دمای آب ورودی به کلکتور همیشه در شرایط گذرا می‌باشد. این شرایط در ساعات اولیه صبح اهمیت بیشتری دارد و یکی از عوامل پایین بودن بازده‌ها می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی آگزرژی کلکتور، اثر تغییر کمیت‌های  $T_a, T_{in}, \eta_o, A_c$  و  $\dot{m}$  بر روی بازده آگزرژی در سه وضعیت مورد نظر در همین ساعت بررسی شد. در این خصوص، وقتی مقادیر مختلفی برای یک کمیت مورد بررسی لحاظ شد، برای سایر کمیت‌ها همان مقادیر مربوط به ساعت 9 در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به تأثیر تغییر متغیرهای مختلف بر روی بازده آگزرژی در شکل‌های (3) تا (7) ارائه شده‌اند. در شکل (3) تغییرات بازده آگزرژی با شار تشعشعی خورشیدی نشان داده شده است. در بازه تغییرات شار تشعشعی، از 300 تا  $1200 \text{ W.m}^{-2}$  برای همه وضعیت‌ها روندی افزایشی برای بازده آگزرژی دیده می‌شود. با افزایش شار تشعشع خورشیدی دمای سیال خروجی از کلکتور افزایش می‌یابد و با توجه به تعریف آگزرژی جریان سیال این افزایش دما باعث افزایش بازده آگزرژی می‌شود.



شکل (3): تغییرات بازده آگزرژی کلکتور با شار تشعشعی خورشیدی

در شکل (4) تغییرات بازده آگزرژی با دمای سیال ورودی به کلکتور نشان داده شده است. برای هر سه وضعیت در ابتدا بازده آگزرژی تا رسیدن به دمای حدود  $70^\circ\text{C}$  افزایش می‌یابد و پس از آن روندی کاهشی دارد. از یک طرف با افزایش  $T_{in}$ ، دمای سیال خروجی نیز افزایش می‌یابد که باعث افزایش بازده آگزرژی می‌شود. از طرف دیگر، افزایش  $T_{in}$  به معنای افزایش دمای سیال داخل کلکتور است که افت حرارتی را زیاد می‌کند، لذا یک  $T_{in}$  بهینه وجود دارد که برای دماهای بیشتر از آن اثر کاهش بازده آگزرژی به دلیل افت حرارتی بیش از اثر افزایش آن، به دلیل افزایش دمای سیال خروجی می‌باشد.

جدول (10): بازده آگزرژی تجربی و تحلیلی، دمای خروجی و ضریب کلی افت کلکتور با بازتابنده‌ها

| زمان  | $U_l$<br>( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) | $T_{0,cal}$<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $\eta_{ex,cal}$<br>(%) | $\eta_{ex,exp}$<br>(%) |
|-------|--|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 9:00  | 7/574  | 49/61                               | 2/5674                 | 2/77                   |
| 9:30  | 7/385  | 51/97                               | 3/0186                 | 3/0751                 |
| 10:00 | 7/921  | 54/21                               | 3/1169                 | 3/1377                 |
| 10:30 | 7/598  | 55/65                               | 3/2713                 | 3/416                  |
| 11:00 | 7/660  | 59/05                               | 3/6824                 | 3/7066                 |
| 11:30 | 7/995  | 61/71                               | 3/9284                 | 3/9536                 |
| 12:00 | 7/887  | 63/77                               | 3/8952                 | 3/9244                 |
| 12:30 | 8/523  | 67/6                                | 4/5348                 | 4/6241                 |
| 13:00 | 8/268  | 67/89                               | 4/1635                 | 4/1973                 |
| 13:30 | 7/686  | 69/3                                | 4/2318                 | 4/207                  |
| 14:00 | 8/302  | 70/4                                | 4/0713                 | 4/0672                 |
| 14:30 | 8/060  | 70/99                               | 3/9564                 | 3/9944                 |
| 15:00 | 8/287  | 70/86                               | 3/7125                 | 3/7265                 |
| 15:30 | 8/535  | 71/27                               | 3/5815                 | 3/5905                 |
| 16:00 | 7/722  | 71/29                               | 3/483                  | 3/5003                 |

جدول (11): بازده آگزرژی تجربی و تحلیلی، دمای خروجی و ضریب کلی افت کلکتور با بازتابنده‌ها و عدسی‌ها

| زمان  | $U_l$<br>( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) | $T_{0,cal}$<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $\eta_{ex,cal}$<br>(%) | $\eta_{ex,exp}$<br>(%) |
|-------|--|-------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 9:00  | 6/673  | 46/66                               | 2/198                  | 2/347                  |
| 9:30  | 6/705  | 47/96                               | 2/429                  | 2/512                  |
| 10:00 | 7/127  | 50/61                               | 2/881                  | 2/940                  |
| 10:30 | 7/752  | 53/06                               | 3/155                  | 3/210                  |
| 11:00 | 7/570  | 55/08                               | 3/301                  | 3/354                  |
| 11:30 | 7/624  | 57/25                               | 3/53                   | 3/582                  |
| 12:00 | 8/202  | 59/12                               | 3/534                  | 3/594                  |
| 12:30 | 8/441  | 60/5                                | 3/461                  | 3/548                  |
| 13:00 | 8/287  | 61/72                               | 3/477                  | 3/549                  |
| 13:30 | 8/538  | 63/66                               | 3/591                  | 3/680                  |
| 14:00 | 8/363  | 64/19                               | 3/598                  | 3/664                  |
| 14:30 | 8/121  | 64/67                               | 3/655                  | 3/710                  |
| 15:00 | 8/841  | 64/79                               | 3/309                  | 3/409                  |
| 15:30 | 8/650  | 65/33                               | 3/109                  | 3/24                   |
| 16:00 | 8/204  | 65/9                                | 3/072                  | 3/136                  |

از جدول‌های (9) تا (11) دیده می‌شود که تغییر  $U_l$  در ساعت‌های مختلف قابل ملاحظه است، به گونه‌ای که در وضعیت کلکتور مرجع تفاوت نسبی  $U_l$  در ساعت 10 در مقایسه با ساعت 16 در حدود 10% است. این تفاوت برای وضعیت‌های دیگر بیشتر نیز می‌باشد. این واقعیت نشان می‌دهد که فرض ثابت بودن  $U_l$  که برخی محققان از جمله [11] در نظر گرفته‌اند، منطقی نیست و لازم است تغییرات آن در محاسبات در نظر گرفته شود. برای هر سه وضعیت، استفاده از کلکتور کمترین بازده انرژی و



در شکل (7) اثر تغییر دبی جرمی سیال عبوری از کلکتور در سه وضعیت مختلف از آزمایش‌ها به ازای دبی‌های از صفر تا  $0/1 \text{kg.s}^{-1}$  نشان داده شده است. دبی استفاده شده در آزمایش‌های مربوط به سه وضعیت مختلف در حدود  $0/055 \text{kg.s}^{-1}$  بوده است. با مراجعه به نتایج ارائه شده در شکل (7) مشخص می‌شود که در شرایط انجام آزمایش‌ها که متغیرهایی مانند دمای محیط، دمای سیال ورودی، بازده اپتیکی، شار تشعشعی و سطح مقطع کلکتور همان مقادیر ذکر شده در جدول‌های (2)، (3) و (4) مربوط به ساعت 9 صبح هستند، برای وضعیت کلکتور مرجع، یعنی بدون تجهیزات اضافی، دبی بهینه‌ای که به ازای آن بازده انرژی بیشینه می‌شود، باید 10 برابر کوچک‌تر یعنی حدود  $0/005 \text{kg.s}^{-1}$  باشد. در این صورت، بازده انرژی به جای 2% حدوداً 2/5% خواهد شد. با وجود این، برای وضعیت استفاده از بازتابنده‌ها و یا بازتابنده‌ها همراه عدسی‌ها بازده انرژی حداکثر در دبی بهینه حدود  $0/01 \text{kg.s}^{-1}$  اتفاق می‌افتد.

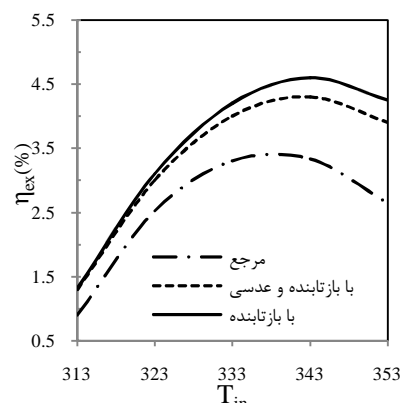
از شکل‌های (3) تا (7) دیده می‌شود که استفاده از بازتابنده‌ها به تنهایی بیش از کاربرد هم‌زمان بازتابنده‌ها و عدسی‌ها موجب افزایش بازده انرژی شده است. در وضعیت استفاده تنها از بازتابنده‌ها افزایش شار تشعشعی ورودی به کلکتور باعث افزایش دمای خروجی از کلکتور می‌شود و عملاً باعث افزایش بازده انرژی می‌شود.

برای بررسی اثر افزایش سطح کلکتور، مطالعه مربوط به اثر دبی جرمی سیال عبوری، برای سطح  $9/25 \text{m}^2$  نیز انجام شده و نتایج در شکل (8) ارائه شده است. از شکل‌های (7) و (8) دیده می‌شود که برای هر سطح از کلکتور و هر وضعیت یک دبی بهینه وجود دارد که به ازای آن، بازده انرژی بیشینه می‌شود.

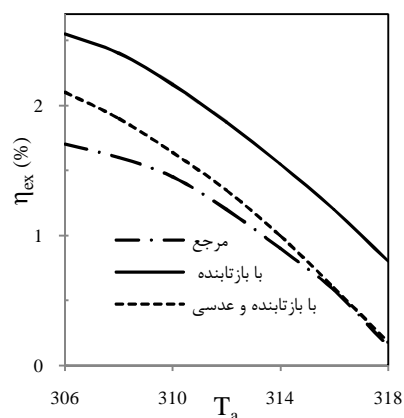
برای سطوح کوچک ابتدا با افزایش دبی سرعت زیاد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بهبود می‌یابد، اما این افزایش سرعت، فرصت انتقال حرارت را کاهش می‌دهد و به همین دلیل، نقطه بهینه‌ای وجود دارد که برای دبی‌های بیشتر از آن، افت بازده انرژی دیده می‌شود. البته چنانچه از مقایسه منحنی‌های شکل (8) با منحنی‌های شکل (7) دیده می‌شود، با افزایش سطح کلکتور این دبی بهینه نیز افزایش می‌یابد.

صحت این نتیجه از مطالعه رابطه (23) تأیید می‌شود، به گونه‌ای که با افزایش سطح کلکتور اثر جمله‌نمایی در این رابطه کاهش می‌یابد و در نهایت، برای سطوح خیلی بزرگ تغییرات بازده انرژی با دبی خطی می‌شود.

در شکل (5) تغییرات بازده انرژی با دمای محیط نشان داده شده است. برای هر سه وضعیت بازده انرژی با افزایش دمای محیط روندی کاهشی دارد. در این شکل نیز به خوبی اثر استفاده از بازتابنده‌ها در افزایش بازده انرژی به دلیل افزایش یافتن شار تشعشع ورودی به کلکتور مشخص است.

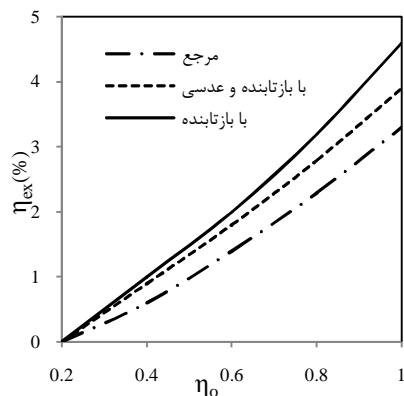


شکل (4): تغییرات بازده انرژی کلکتور با دمای سیال ورودی



شکل (5): تغییرات بازده انرژی کلکتور با دمای محیط

در شکل (6) اثر افزایش بازده اپتیکی بر روی بازده انرژی نشان داده شده است. با افزایش بازده اپتیکی در هر سه وضعیت کلکتور جذب تشعشع توسط صفحه جذب بهبود می‌یابد و موجب افزایش دمای سیال داخل کلکتور و در نتیجه افزایش بازده انرژی می‌شود.



شکل (6): تغییرات بازده انرژی کلکتور با بازده اپتیکی

3. در سطح‌های کوچک و بزرگ کلکتور با افزایش دبی ابتدا بازده اگزرژی افزایش می‌یابد، ولی برای هر سطح خاص یک دبی بهینه منحصر به فردی وجود دارد که به ازای آن، بازده اگزرژی به حداکثر می‌رسد. برای دبی‌های بیشتر ابتدا بازده اندکی کاهش می‌یابد و سپس تغییر چندانی نمی‌کند.

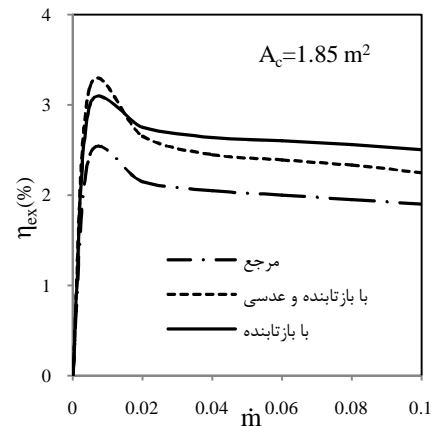
4. به طور کلی، استفاده از بازتابنده‌ها و بازتابنده‌ها به همراه عدسی‌ها باعث بهبود بازده اگزرژی می‌شود. با وجود این، استفاده از بازتابنده‌ها به تنهایی نسبت به استفاده هم‌زمان آن‌ها با عدسی‌ها مناسب‌تر است. به طور کلی، در شرایطی که روند تغییر بازده اگزرژی با تغییر متغیرهای اثرگذار به صورت افزایشی است، استفاده از بازتابنده‌ها افزایش بازده را سرعت می‌بخشد. همچنین در شرایطی که روند تغییر بازده اگزرژی با تغییر این متغیرها به صورت کاهشی است، روند کاهش بازده را کند می‌کند.

5. برای کلکتور بررسی شده در این مطالعه در هر سه وضعیت مرجع، استفاده از بازتابنده‌ها و استفاده از بازتابنده‌ها به همراه عدسی‌ها در مقایسه با بقیه متغیرهای اثرگذار افزایش دمای سیال ورودی و افزایش بازده اپتیکی منجر به افزایش بیشتری در بازده اگزرژی می‌شوند.

6. عملکرد کلکتور در یک مدار بسته در شرایطی که دمای منبع ذخیره، به دلیل عدم استفاده از گرمای ذخیره شونده در آن افزایش می‌یابد، باعث می‌شود که دمای سیال ورودی به کلکتور به طور مداوم زیاد شود. افزایش دما تا اندازه‌ای مشخص باعث افزایش بازده اگزرژی و بیش از آن باعث کاهش این بازده می‌شود.

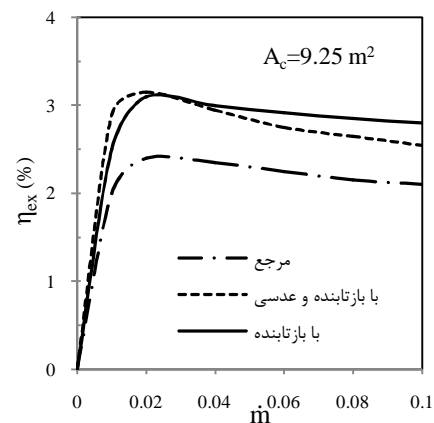
## سیاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان این مقاله از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان به دلیل حمایت از انجام این تحقیق قدردانی می‌کنند. همچنین با توجه به استفاده از نتایج به دست آمده در آزمایش‌های انجام شده در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر با راهنمایی و نظارت مشترک جناب آقای دکتر رضا حسینی ابرده و نویسنده اول این مقاله، از زحمات ایشان و آن دانشگاه محترم تشکر می‌شود.



شکل (7): تغییرات بازده اگزرژی کلکتور با دبی جرمی سیال

در هر سه وضعیت در  $A_c=1/85m^2$



شکل (8): تغییرات بازده اگزرژی کلکتور با دبی جرمی سیال

در هر سه وضعیت در  $A_c=9/25m^2$

## 6. نتیجه‌گیری

تعیین مقادیری از دبی، سطح مقطع و دیگر کمیت‌ها که بازده انرژی یک کلکتور به ازای آن‌ها بیشینه می‌شود، دشوار است، ولی در مفهوم بازده اگزرژی، اثرگذاری متغیرها واضح‌تر است. در این مطالعه، بهینه‌سازی یک کلکتور خورشیدی در مدار بسته در هر سه وضعیت مختلف از دیدگاه تحلیل اگزرژی با متغیر در نظر گرفتن  $U_1$  و مساوی در نظر نگرفتن دمای سیال ورودی با دمای محیط انجام شد. در این خصوص، اثر استفاده از بازتابنده‌ها و بازتابنده‌ها همراه با عدسی‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

1. افزایش شار تشعشع خورشیدی و همچنین افزایش بازده اپتیکی موجب افزایش بازده اگزرژی کلکتور در تمام وضعیت‌ها می‌شود.
2. با افزایش دمای محیط بازده اگزرژی کاهش می‌یابد، ولی با افزایش دمای سیال ورودی به کلکتور، بازده اگزرژی تا رسیدن به یک دمای مشخص افزایش، و پس از آن کاهش می‌یابد.

## فهرست علائم

|                   |           |                 |   |
|-------------------|-----------|-----------------|---|
|                   |           | $A$             | مساحت ( $m^2$ )                               |
|                   | $a$       | $c_p$           | ظرفیت گرمایی ویژه سیال ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) |
| محیط              | $b$       | $\frac{I}{c_b}$ | مقاومت لحیم اتصال ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )       |
| پشت               | $c$       | $\dot{E}$       | نرخ انرژی ( $J.s^{-1}$ )                      |
| کلکتور            | $cal$     | $F'$            | ضریب بازده کلکتور                             |
| محاسبه شده        | $des$     | $F_R$           | ضریب انتقال گرمای کلکتور                      |
| اتلاف شده         | $e$       | $I$             | شدت تشعشع خورشیدی ( $W.m^{-2}$ )              |
| اطراف             | $en$      | $k$             | هدایت حرارتی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )            |
| انرژی             | $ex$      | $\dot{m}$       | دبی سیال ( $kg.s^{-1}$ )                      |
| انرژی             | $exp$     | $P$             | فشار سیال (Pa)                                |
| تجربی             | $f$       | $Q$             | نرخ انتقال حرارت (W)                          |
| سیال              | $i$       | $S$             | شار تشعشع جذب شده ( $W.m^{-2}$ )              |
| عایق              | $in$      | $T$             | دما (K)                                       |
| ورود              | $l, loss$ | $U$             | افت کلی از کلکتور ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )       |
| هدر رفته          | $o$       | $V$             | سرعت ( $m.s^{-1}$ )                           |
| خروجی             | $out$     | $W$             | فاصله مرکز تا مرکز لوله (m)                   |
| خروج              | $p$       | علائم یونانی    |   |
| صفحه جاذب         | $s$       | $\alpha$        | ضریب جذب                                      |
| ذخیره شده، خورشید | $T$       | $\beta$         | شیب کلکتور (درجه)                             |
| برخوردی، بالا     |           | $\Delta$        | اختلاف فشار (یا اختلاف دما)                   |
|                   |           | $\varepsilon$   | ضریب صدور                                     |
|                   |           | $\eta$          | بازده (%)                                     |
|                   |           | $\eta_0$        | بازده اپتیکی (%)                              |
|                   |           | $\tau$          | ضریب عبور                                     |
|                   |           | $\rho$          | چگالی ( $kg.m^{-3}$ )                         |
|                   |           | $(\tau\alpha)$  | حاصل ضرب مؤثر ضریب جذب و عبور                 |

## مراجع

- [1] McDaniels, D.K., Lawndes, D.H., "Enhanced Solar Energy Collection Using Reflector-solar Thermal Collector Combination" Solar energy, Vol. 17, No. 5, pp. 277-283, 1975.
- [2] Baker, S., MDaniels, D.K., Kaehn, H.D., Lowndes, D.H., "Time Integrated Calculation of the Insolation Collected by a Reflector-collector System" Solar energy, Vol. 20, No. 5, pp. 415-417, 1978.
- [3] Pucar, M.D.J., Despica, A.R., "The Enhancement of Energy Gain of Solar Collectors and Photovoltaic Panels by the Reflection of Solar Beams" Energy, Vol. 27, No. 3, pp. 205-223, 2002.
- [4] عظیمی، آناهیتا، مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی اثرات استفاده از متمرکز کننده و منعکس کننده تخت بر روی عملکرد کلکتور صفحه تخت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، ایران، 1390.
- [5] Bejan, A., *Advanced Engineering Thermodynamics*, New York, Wiley Inter science, 1988.
- [6] Luminosu, I., Fara, L., "Determination of the Optimal Operation Mode of a Flat SolarCollector by Exergetic

- Analysis and Numerical Simulation*" Energy, Vol. 30, No. 5, pp. 731–747, 2005.
- [7] Dutta Gupta, K.K., Saha, S., "Energy Analysis of Solar Thermal Collectors" Renewable energy and environment, Vol. 33, No. 1, pp. 283-287, 1990.
- [8] Hall, C.A., Glakpe, E.K., Cannon, J. N., Kerslake, T. W., "Thermodynamic Analysis of Space Solar Dynamics Heat Receivers with Cyclic Phase Change" Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 121, No. 3, pp. 133-144, 1999.
- [9] Mahanta, D.K., Kumar, S.S., "Internal Irreversibility in a Water Heating Solar Flat Plate Collector" Energy Conversion and Management, Vol. 43, No. 17, pp. 2425-2435, 2002.
- [10] Torres-Reyes, E., Navarrete-Gonzalez, J.J., Cervantes-de Gortari, J.G., "Thermodynamic Optimization as an Effective Tool to Design Solar Heating Systems" Energy, Vol. 29, No. 12-15, pp. 2305-2315, 2004.
- [11] Farahat, S., Sarhaddi, F., Ajam, H., "Exergetic Optimization of Flat Plate SolarCollectors" Renewable Energy, Vol. 34, No. 4, pp.1169-1174, 2009.
- [12] Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York, John Wiley & Son, 2006.
- [13] Suzuki, A., "General Theory of Exergy Balance Analysis and Application to Solar Collectors" Energy, Vol. 13, No. 2, pp 123-128, 153–160, 1988.
- [14] Bejan, A., Keary, D.W., Kreith, F., "Second Law Analysis and Synthesis of Solar Collector Systems" Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 103, No. 1, pp. 23–28, 1981.
- [15] Kahrobaian, A., Malekmohammadi, H., "Exergy Optimization Applied to Linear Parabolic Solar Collectors" Journal of Faculty of Engineering University of Tehran, Vol. 42, No. 1, pp. 131–144, 2008.