

مدل‌سازی و تحلیل پارامترهای کلکتور خورشیدی لوله‌خلاقلاً با لوله U شکل برای چهار اقلیم در ایران

محمد امین بهرامی^{۱*}، محمد رهنما^۲

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

mab124000@gmail.com

^۲ استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

Rahnama@uk.ac.ir

چکیده: در این مطالعه، بر اساس موازنه انرژی برای اجزای مختلف کلکتور خورشیدی لوله‌خلاقلاً دوجداره با لوله U، عملکرد حرارتی یک واحد کلکتور به صورت مجزا با روش تحلیلی و به صورت شبه‌دینامیکی بررسی می‌شود. مدل استفاده‌شده در این مطالعه، توزیع دما در راستای طولی و شعاعی و محیطی را در نظر می‌گیرد. در تحلیل به صورت شبه‌دینامیکی اثر پارامترهای مختلف از جمله اندازه کلکتور، ضریب اتلاف حرارتی، ضریب جذب لوله‌جاذب، دبی جرمی و مقاومت حرارتی لایه هوا در اقلیم مختلف آب‌وهوایی بر عملکرد کلکتور بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش قطر لوله با طول ثابت بازده حرارتی سالیانه کلکتور افزایش پیدا می‌کند. همچنین در لوله با قطر ثابت، با افزایش طول لوله، بازده سالیانه افزایش پیدا می‌کند؛ اما این افزایش در طول‌های بیشتر از ۱/۵ متر بسیار کم است. دبی جرمی بهینه برای به دست آوردن ماکزیمم بازده، برای شهرهای کرمان، بوشهر، بندر انزلی و همدان که اقلیم‌های متفاوتی دارند، به دست آمد. بر اساس نتایج حاصل، دبی بهینه برای اقلیم‌های مختلف مقادیر متفاوتی دارد که می‌توان آن را به صورت رابطه‌ای بین تشعشع کل خورشیدی متوسط سالیانه به عنوان نماد اقلیم و دبی بهینه بیان کرد.

واژه‌های کلیدی: کلکتور خورشیدی، لوله‌خلاقلاً، نوع U، U شکل، شبیه‌سازی دینامیکی.

۱. مقدمه

صادق‌زاده [۵] تأثیر کلید تایمر^۷ (زمان کار) بر کارایی آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را بررسی کرد و نتایج تحقیق او نشان داد که استفاده از این کلید به‌خصوص در فصول سرد سال باعث افزایش کارایی کلکتور تا بیش از ۲۰٪ و کاهش ۷۰۰ کیلووات ساعت برق مصرفی آن می‌شود. کیم و سئو [۶] عملکرد حرارتی کلکتور لوله‌خلاقاً دوجداره برای چهار جاذب با شکل‌ها و آرایش‌های مختلف را به‌صورت عددی و تجربی مقایسه کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، لوله U جوش داده شده داخل فین دایره‌ای، بهترین نوع جاذب برای این نوع کلکتور خورشیدی بود. البته با در نظر گرفتن تشعشع مستقیم، تشعشع دیفیوز و سایه، مدلی که لوله U بر روی یک صفحه مسی جوش داده شده عملکرد بهتری نشان داد. ما و همکاران [۷] کلکتور لوله‌خلاقاً با لوله U را به‌صورت یک‌بعدی، تحلیلی و پایا با استفاده از روش شبکه حرارتی مدل‌سازی کردند و پارامترهای مؤثر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین مقاومت حرارتی، مقاومت حرارتی لایه هوا بین لوله جاذب و فین است که با کاهش این مقاومت می‌توان تا ۱۰٪ بازده کلکتور را افزایش داد.

لیانگ و همکاران [۸] عملکرد حرارتی کلکتور لوله‌خلاقاً با لوله U که داخل لوله‌خلاقاً به‌منظور کاهش مقاومت حرارتی به‌جای فین با ماده‌ای با ضریب هدایت حرارتی بالا پر شده بود، به‌صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. دمای سیال عامل در راستای جریان و بازدهی حرارتی بر اساس موازنه انرژی محاسبه و اثر ضریب افت حرارت و هدایت حرارتی بر عملکرد حرارتی کلکتور ارزیابی شد. در حالتی که ضریب هدایت حرارتی ماده واسط انتقال حرارت 100 W/m.c بود، بازدهی حرارتی آن ۱۲٪ بیشتر از کلکتور لوله‌خلاقاً U شکل گزارش شد. گائو و همکاران [۹] اثر جرم حرارتی و دبی جرمی بر عملکرد حرارتی کلکتور لوله‌خلاقاً تمام‌شیشه و نوع U را بررسی و با هم مقایسه کردند. در این مطالعه ضرورت لحاظ کردن جرم حرارتی در مدل ریاضی برای کلکتور تمام‌شیشه توسط داده‌های تجربی اثبات شد. بر اساس این مطالعه، برای دبی‌های بین ۱۰ تا ۷۰ کیلوگرم بر ساعت بر مترمربع $(\text{kg/h} \cdot \text{m}^2)$ بازده حرارتی متوسط کلکتور U شکل از نوع تمام‌شیشه بیشتر و انرژی ذخیره‌شده در نوع تمام‌شیشه بین ۲۵ تا ۳۰٪ کمتر بوده است.

میشرا و همکاران [۱۰] مدل ریاضی تحلیلی و یک‌بعدی برای کلکتور لوله‌خلاقاً نوع U درحالی‌که آرایش لوله‌ها به‌صورت سری بود، ارائه کرده و بر اساس این مدل، معادله مشخصه را برای کلکتور به دست آوردند. در این مدل، تمام ضرایب انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته

انرژی خورشیدی منبعی لایزال و تجدیدپذیر است که می‌تواند تمام انرژی مورد نیاز بشر را تأمین کند. در دهه گذشته، بازار جهانی برای استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید برق و حرارت افزایش چشمگیری را تجربه کرده و دستاوردهای فناورانه زیادی در انواع مختلف کلکتورهای خورشیدی به دست آمده است. کشور چین به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده و مصرف‌کننده آب‌گرمکن‌های خورشیدی تا سال ۲۰۱۵ رکورد مساحت نصب کلکتور، برابر با ۴۰۶ میلیون متر مربع را ثبت کرده است [۱].

دو نوع عمده از کلکتورهای خورشیدی در سیستم‌های خورشیدی حرارتی کلکتورهای صفحه تخت^۱ و کلکتورهای لوله‌خلاقاً^۲ (ETC) هستند [۱]. کلکتور خورشیدی لوله‌خلاقاً که ترکیب پوشش جاذب انتخابی^۳ و عایق خلاقاً را فراهم می‌کند، عملکرد حرارتی بهتری نسبت به کلکتور صفحه تخت در آب‌وهوای سرد تجربه می‌کند. کلکتورهای لوله‌خلاقاً به سه دسته عمده ترموسیفون^۴، لوله حرارتی و یو پایپ^۵ تقسیم می‌شوند که هر یک مزایا و معایبی دارند. موضوع اصلی این مقاله بررسی کلکتور لوله‌خلاقاً از نوع لوله U می‌باشد. در قسمتی از تحقیقات گذشته، کلکتورهای لوله‌خلاقاً بر روی بهبود عملکرد حرارتی آن‌ها متمرکز شده است. شروع تحقیقات در زمینه کلکتورهای لوله‌خلاقاً به بیش از دو دهه قبل برمی‌گردد که یکی از پارامترهای مهم تحت عنوان بازده اپتیکی در آن زمان به‌وسیله ویندو و زیبرت [۲] مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها بازده اپتیکی کلکتور لوله‌خلاقاً تک‌داره با بازتاب‌کننده‌های مختلف را با روش دنبال کردن پرتوها به دست آوردند. در ادامه، هاردینگ و همکاران [۳] عبارتی برای بازده لحظه‌ای کلکتور لوله‌خلاقاً دوجداره با لوله U شکل به‌صورت عددی و تجربی به دست آوردند.

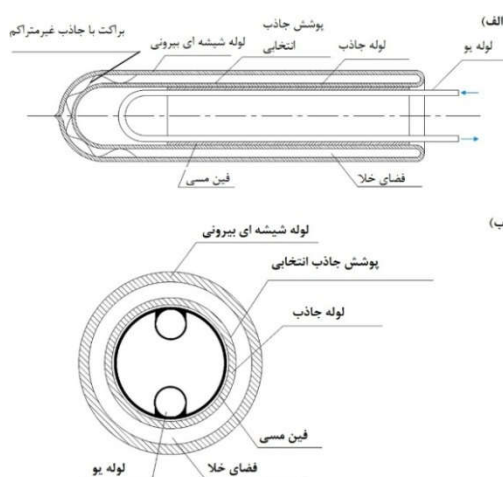
در خصوص آبگرمکن‌های لوله‌خلاقاً، موریسون و همکاران [۴] تحقیقات زیادی انجام داده و عملکرد کلکتور خورشیدی لوله‌خلاقاً تمام‌شیشه^۶ را به‌صورت تجربی و بر اساس استاندارد تست ISO 9459-2 برای مکان‌های مختلفی مورد بررسی قرار دادند [۴]. آن‌ها عوامل مؤثر بر عملکرد کلکتور را بر اساس مطالعه عددی بر روی چرخش آب در انتهای لوله‌های ترموسیفون ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی عددی اولیه آن‌ها نشان از وجود یک ناحیه غیرفعال در منطقه نزدیک به انتهای آب‌بندی شده داشت که امکان تأثیر بر عملکرد کلکتور را دارد.

1. Flat Plate Solar Collector
2. Evacuated Tube Solar Collector
3. Selective Absorbing Coating
4. Thermosiphon
5. U Pipe
6. All glass Evacuated Tube

مدلسازی و شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج این تحقیق، بازده حرارتی آرایه‌ها به‌طور متوسط ۶٪ با نتایج تجربی اختلاف داشت. در اکثر مطالعات گذشته، عملکرد کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء و پارامترهای مؤثر بر آن به‌صورت پایا و حداکثر در یک شرایط آب‌وهوایی خاص بررسی شده است، در صورتی که به نظر می‌آید برای طراحی دقیق‌تر با توجه به شرایط واقعی (دینامیکی) که کلکتور در آن قرار می‌گیرد، نیازمند بررسی دینامیکی عملکرد کلکتور در اقلیم‌های مختلف و بررسی تأثیر آن است. در این مقاله، عملکرد حرارتی یک واحد کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء نوع U بر اساس موازنه انرژی و به‌صورت شبه دینامیکی^۳ برای چهار شهر بررسی می‌شود. براین اساس، تأثیر پارامترهای مؤثر بر عملکرد کلکتور از جمله اندازه، ضریب جذب^۴ لوله‌خلاء، ضریب اتلاف حرارتی^۵ و دبی جرمی به‌صورت شبه‌دینامیکی برای چهار شهر کرمان، بوشهر، همدان و بندر انزلی با خصوصیات اقلیمی مختلف تحلیل می‌شود.

۲. مدل‌سازی ریاضی

کلکتور خورشیدی در نظر گرفته‌شده در این مطالعه لوله‌خلاء شیشه‌ای دوجداره است که این لوله‌ها در یک طرف به هم متصل شده‌اند و یک لایه پوشش جذب بر روی سطح خارجی لوله داخلی کشیده شده است. فضای بین دو لوله، خلاء است. در نتیجه انرژی خورشیدی جذب‌شده بالا بوده و اتلاف حرارتی به دلیل کاهش اتلاف‌های هدایتی و جابه‌جایی بسیار کم است. نمایش لوله‌خلاء تمام‌شیشه، نمای مقطع طولی، نمای مقطع عرضی آن در شکل (۱) و جزئیات پارامترهای کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء U شکل در جدول (۱) نشان شده است.



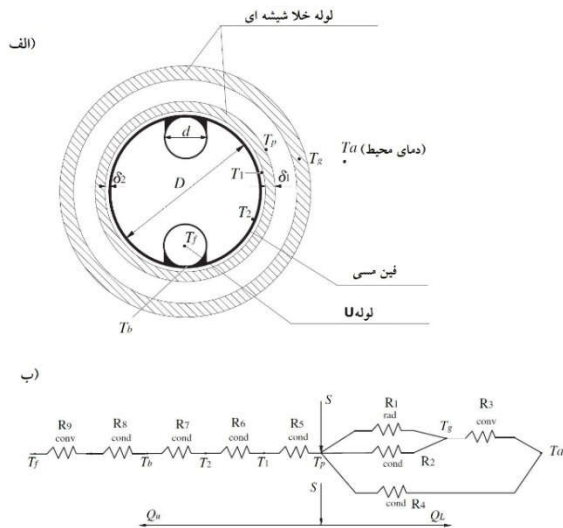
شکل (۱): کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء شیشه‌ای الف. نمایش لوله‌خلاء شیشه‌ای؛ ب. مقطع عرضی [۶]

شد. با دبی جرمی ثابت 0.02 kg/s ، دمای خروجی کلکتور از $91/53^\circ\text{C}$ به $129/23^\circ\text{C}$ و گرمای دریافتی مفید از $3/25 \text{ kWh}$ به $6/34 \text{ kWh}$ رسید، درحالی‌که تعداد کلکتورهای سری از دو به شش افزایش پیدا می‌کرد. همچنین انرژی و آگزرژی دریافتی ماهیانه برای چهار واحد کلکتور به‌صورت سری در دبی جرمی 0.02 kg/s محاسبه شد. در حالتی که تعداد واحدهای سری از دو به شش افزایش پیدا می‌کند، بازدهی حرارتی لحظه‌ای از $53/5\%$ به $34/4\%$ کاهش یافت. همچنین می‌شود و همکاران [۱۱] که در سال ۲۰۱۵، معادله مشخصه کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء نوع U را به دست آورده بودند، مدل ریاضی برای این نوع کلکتور به همراه متمرکزکننده سهموی مرکب (CPC) ارائه دادند. برای شش واحد به‌صورت سری کلکتور لوله‌خلاء با CPC و بدون CPC بیشترین اختلاف دمای آب به ترتیب 24°C و 17°C گزارش شد. انرژی حرارتی دریافتی سالیانه به ترتیب $1461/63 \text{ kWh}$ و $1859/66 \text{ kWh}$ برای ETC و ETC-CPC محاسبه شد.

نایی و همکاران [۱۲] عملکرد کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء U شکل را در حالتی که دمای محیط بالاتر از دمای سیال عامل است، مورد بررسی تجربی قرار دادند. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، بازده حرارتی کلکتور در دبی‌های جرمی و تشعشع‌های خورشیدی مختلف به دست آمد و مشخص شد که بازده با دبی و تشعشع رابطه مستقیم و با دمای ورودی کلکتور رابطه معکوس دارد. ابوکروش و همکاران [۱۳] مدل جدیدی از کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء U شکل ارائه کردند. آن‌ها با اضافه کردن مواد تغییرفازدهنده به کلکتور، در دو حالت با فین و بدون فین، عملکرد آن را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد انرژی استخراج‌شده در این حالت تا 50% بیشتر از حالت بدون مواد ذخیره‌ساز انرژی است. نایک و همکاران [۱۴] کلکتور لوله‌خلاء U شکل را در حالتی که چند کلکتور کنار هم قرار می‌گیرند، مدل‌سازی کرده و به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها علاوه بر آنالیز انرژی، آنالیز آگزرژی نیز انجام داده و بر اساس این تحلیل‌ها روابطی برای پیش‌بینی بازده انرژی و آگزرژی به دست آورده که خطای این روابط کمتر از 7% گزارش شده است. کرس و همکاران [۱۵] آرایه‌ای از چهار کلکتور خورشیدی لوله‌خلاء U شکل با متمرکزکننده سهموی مرکب را به‌صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. کارکرد مجموعه کلکتور در محدوده دمای ورودی 35°C - 80°C ارزیابی شد. به‌علاوه روش تحلیلی، کلکتور در نرم‌افزار سالیدورکس^۲ با روش دینامیک سیالات محاسباتی و در حالت گذرا

3. Quasi Dynamic
4. Absorptivity
5. Overall Heat Loss Coefficient

1. Compound Parabolic Concentrator
2. Solidworks



شکل (۲): آرایش سیستم برای کلکتور لوله خلاء الف. آرایش سیستم ب. شبکه حرارتی [۶]

شار حرارتی متوسط در راستای محیطی به عنوان شرط مرزی شار ثابت استفاده می شود؛ اگرچه شارحرارتی به صورت یکسان برای کلکتور خورشیدی واقعی توزیع نمی شود و در نهایت، فرایند انتقال حرارت به صورت پایا فرض می شود.

بر اساس مدار مقاومت های حرارتی نشان داده شده در شکل (۲)، میزان جذب انرژی حرارتی جذب شده توسط آب، Q_u ، را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Q_u = S - Q_L \quad (1)$$

که S مقدار انرژی خورشیدی جذب شده توسط پوشش جاذب لوله داخلی است و Q_L اتلاف حرارت از لوله است. با توجه به شکل (۲) ضریب اتلاف حرارتی کل را می توان به صورت زیر به دست آورد:

$$U_L = \frac{1}{\frac{1}{h_{g-a}} + \frac{1}{h_{p-g,r} + h_{p-g,c}}} + U_e \quad (2)$$

که در آن، U_e ضریب افت حرارت ضلعی لوله هدر است و به ضریب هدایت حرارتی عایق، ضخامت عایق و مساحت سطح لوله هدر بستگی دارد (مقاومت R_4). همچنین با در نظر گرفتن ضریب اتلاف حرارتی کل U_L ، شار حرارتی جذب شده توسط سیال در واحد طول آن را می توان به صورت زیر نوشت:

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_f - T_a)] \quad (3)$$

در این رابطه، F' ضریب بازدهی کلکتور است که از رابطه (۴) قابل محاسبه است [۷]:

$$F' = \frac{1}{U_L \left[\frac{1 + \frac{U_L}{C_b}}{U_L[d + (W-d)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{h_{f,i}\pi d} \right]} \quad (4)$$

لوله U داخل یک فین دایره ای جوش داده یا با انطباق فشاری قرار می گیرد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده، انرژی خورشیدی با مقدار S به وسیله پوشش جاذب جذب می شود که برابر با تشعشع خورشیدی ورودی منهای افت های اپتیکی^۱ است و سپس انرژی خورشیدی جذب شده به سیال عامل منتقل می شود.

| ردیف | ماده | پارامتر | مقدار | واحد |
|------|--------------------|---------------------------------|-------|---------|
| ۱ | پوشش جاذب | ضریب جذب | ۰/۹۲ | ----- |
| ۲ | لوله شیشه ای خارجی | ضریب صدور | ۰/۰۸ | ----- |
| | | قطر خارجی | ۴۷ | mm |
| | | ضخامت | ۱/۲ | mm |
| | | هدایت حرارتی | ۱/۲ | W/(m K) |
| | | قطر خارجی | ۳۷ | mm |
| ۳ | لوله جاذب | ضخامت | ۱/۲ | mm |
| | | هدایت حرارتی | ۱/۲ | W/(m K) |
| | | ضخامت | ۰/۶ | mm |
| ۴ | فین مسی | هدایت حرارتی | ۳۰۷ | W/(m K) |
| | | ضخامت | ۱ | mm |
| ۵ | لایه هوا | هدایت حرارتی | ۰/۰۳ | W/(m K) |
| ۶ | لوله U | قطر خارجی | ۸ | mm |
| ۷ | ----- | طول لوله | ۱۲۰۰ | mm |
| ۸ | ----- | هدایت حرارتی اتصال فین و لوله U | ۳۰ | W/(m K) |

به عبارت دیگر، حرارت دریافتی خالص برابر است با اختلاف بین S و افت حرارتی از میان لوله شیشه ای به دلیل مکانیزم های انتقال حرارت هدایتی، جابه جایی و تشعشعی. عملکرد حرارتی کلکتور با مدل تحلیلی یک بعدی برای یک واحد کلکتور لوله خلاء شیشه ای در این مطالعه بررسی می شود. برای ساده سازی محاسبات بدون از دست دادن چشمگیر دقت، فرضیات زیر انجام می شود.

- مقاومت حرارتی هدایتی لایه شیشه ای بیرونی ناچیز است.
- جذب تشعشع خورشیدی توسط لوله شیشه ای بیرونی صرف نظر می شود.
- ضریب انتقال حرارت جابه جایی بین لوله شیشه ای و اتمسفر ثابت است.
- ضریب افت از لوله هدر^۲ ثابت است.

1. Optical Loss
2. Header

$$Nu_a = \begin{cases} 0.4 + 0.54Re_a^{0.52} & 0.1 < Re_a < 1000 \\ 0.3Re_a^{0.6} & 1000 < Re_a < 50000 \end{cases} \quad (9)$$

$$Re_a = \frac{u_a D_g}{\nu_a} \quad (10)$$

همچنین برای ضریب انتقال حرارت بین سیال و جداره لوله U

$h_{f,i}$ (مقاومت R_9)، از رابطه (۱۱) تا (۱۴) استفاده شده است [۱۹]:

$$h_{f,i} = \frac{Nu_f \lambda_f}{d} \quad (11)$$

$$Nu_f = \begin{cases} 1.86 \left(\frac{Re_f Pr_f}{L/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_1} \right)^{0.14} & Re_f \leq 2300 \\ \frac{f}{8} (Re_f - 1000) Pr_f & Re_f > 2300 \end{cases} \quad (12)$$

$$f = \frac{1}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} (Pr_f^{2/3} - 1)} \quad (13)$$

$$f = [0.790 \ln(Re_f) - 1.64]^{-2} \quad (13)$$

$$Re_f = \frac{4\dot{m}_f}{\pi d \mu_f} \quad (14)$$

شایان ذکر است که یک‌بعدی در نظر گرفتن مدل، امر بسیار رایج در کلکتورهای خورشیدی است. برای مثال در مراجع [۶-۱۱] از مدل یک‌بعدی استفاده شده است. علت این امر، اولاً ساده بودن در عین حفظ دقت است، به‌خصوص زمانی که شبیه‌سازی دینامیکی صورت می‌گیرد این مؤلفه از اهمیت دوچندانی برخوردار می‌شود. ثانیاً با فرض یک‌بعدی بودن، می‌توان از روش شبکه حرارتی بهره برده و اثر پارامترهای مختلف را بر فرایند انتقال حرارت به‌خوبی مشاهده کرد.

جزئیات پارامترهای در نظر گرفته‌شده در مدل تحلیلی مطابق کارمراجع [۶] است. به‌منظور محاسبه مقادیر عددی و بررسی تأثیر آن‌ها در عملکرد کلکتور، مدل ریاضی ارائه‌شده در نرم‌افزار متلب به‌صورت یک برنامه کامپیوتری نوشته شده و نتایج در قسمت بعد ارائه شده است.

۲.۲. انتخاب شهرها برای شبیه‌سازی

شهرهای ایران را می‌توان بر اساس پارامترهای مختلف از جمله دمای هوا، رطوبت، ارتفاع از سطح دریا (فشار هوا)، تشعشع خورشیدی و... به اقلیم‌های مختلفی تقسیم کرد. بر اساس یک تقسیم‌بندی رایج، ایران به شش اقلیم بر اساس دمای هوا و رطوبت تقسیم می‌شود. درحالی‌که در مبحث خورشیدی دو پارامتر دمای هوا و میزان تشعشع خورشیدی دو مؤلفه تأثیرگذار بر عملکرد این سیستم‌ها هستند. بنابراین تقسیم‌بندی‌های رایج برای این موضوع کارساز نیست. شهرهای ایران را می‌توان بر اساس دمای هوا (زمستانه، تابستانه یا کل) و تشعشع خورشیدی به سه بخش تقسیم کرد. شهرهای دارای تشعشع خوب (۴۶۴ تا ۶۰۳ وات بر متر مربع) مانند کرمان، اهواز و بوشهر. شهرهای دارای تشعشع متوسط

در معادله (۴)، C_b ضریب هدایت حرارتی مجموع مقاومت‌های R_5 (مقاومت حرارتی هدایتی لوله شیشه‌ای داخلی) و R_6 (مقاومت حرارتی هدایتی لایه هوا بین لوله جاذب و فین دایره‌ای) است و C_B ضریب هدایت حرارتی اتصال لوله یو و فین دایره‌ای است (مقاومت R_8). عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی لوله خلأ با محاسبه بازده کلکتور خورشیدی، η ، بررسی می‌شود که به‌صورت نسبت حرارت دریافتی خلأ به انرژی خورشیدی ورودی بر اساس مساحت بازتابی کلکتور خورشیدی، A_p تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{m C_{p,f} (T_{out} - T_{in})}{I_0 A_p} \quad (5)$$

و A_p به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$A_p = 2DL \quad (6)$$

۱.۲. ضرایب انتقال حرارت

در مطالعات گذشته برخی یا همه ضرایب انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته شده‌اند. در کار حاضر، برای افزایش دقت، اکثر ضرایب انتقال حرارت متغیر لحاظ شده‌اند. ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین سطح بیرونی لوله داخلی (سطح جاذب) و سطح داخلی لوله بیرونی، $h_{p-g,r}$ (مرتبط با مقاومت R_1)، با تغییر دمای لوله جاذب، T_p ، و دمای لوله شیشه‌ای خارجی، T_g ، تغییر می‌کند و می‌توان آن را به‌صورت زیر بیان کرد [۱۶]:

$$h_{p-g,r} = \frac{\sigma \epsilon_p}{1 + \frac{\epsilon_p D}{\epsilon_g D_g} (1 - \epsilon_p)} (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g) \quad (7)$$

که ϵ_p ضریب صدور پوشش جاذب انتخابی، ϵ_g ضریب صدور سطح داخلی لوله خارجی، σ ضریب استفن-بولتزمن و D_g قطر داخلی لوله شیشه‌ای خارجی است.

ضریب انتقال حرارت هدایتی بین لوله جاذب و لوله شیشه‌ای بیرونی $h_{p-g,c}$ (مرتبط با مقاومت R_2) و ضریب اتلاف حرارت ضلعی U_e (مرتبط با مقاومت R_4) را نمی‌توان به‌صورت مؤثری پیش‌بینی کرد؛ زیرا آن‌ها به محیط و کیفیت تولید مرتبط می‌شوند. در این مطالعه، از نتایج تجربی [۱۷] استفاده شده که ضریب انتقال حرارت هدایتی $h_{p-g,c}$ و ضریب اتلاف حرارت ضلعی U_e به ترتیب $W/(m^2K)$ 0.2796 و $W/(m^2K)$ 0.1687 است. برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین لوله شیشه‌ای خارجی و محیط اطراف، h_{g-a} (مقاومت R_3)، می‌توان از روابط (۸) تا (۱۰) بهره برد [۱۸]:

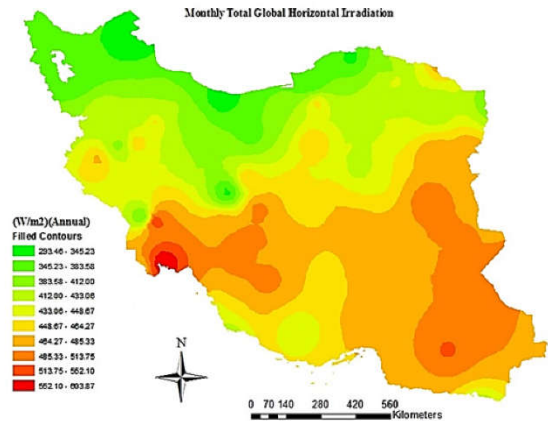
$$h_{g-a} = \frac{Nu_a \lambda_a}{D_g} \quad (8)$$

آب شهر اگر از آب های زیرزمینی تأمین شود، خاک در عمق های بیشتر از ۱۵ متر دمای ثابتی دارد و متأثر از اقلیم آب و هوایی نیست. آنگونه که در کرمان توسط ما مشاهده شد، در گرم ترین زمان سال (تیر و مرداد) دمای آب شهری از 28°C تجاوز نکرده و در طول روز تقریباً ثابت بود. این در حالی است که دمای مطلوب برای آب گرم مصرفی بر اساس استاندارد Ashrae [۲۲] 60°C است. لذا استفاده از آب گرم کن خورشیدی برای این مناطق دارای فایده است. از طرف دیگر، اگر فرض شود دمای آب شهری متأثر از دمای محیط است (احتمالاً مانند شهرهایی که آب آن ها از سد تأمین می شود و به دلیل تأثیر لوله کشی شهری از محیط) در فصول سرد سال به کارگیری کلکتورهای خورشیدی برای کاهش مصرف سوخت های فسیلی مؤثر است، اگرچه در بدترین شرایط نیز دمای آب با دمای محیط متفاوت است و با توجه به میانگین دمای شهرهای گرم در طول سال و فاصله آن با 60°C بررسی آن ها برای این مناطق نیز سودمند به نظر می رسد.

۳. اعتبارسنجی

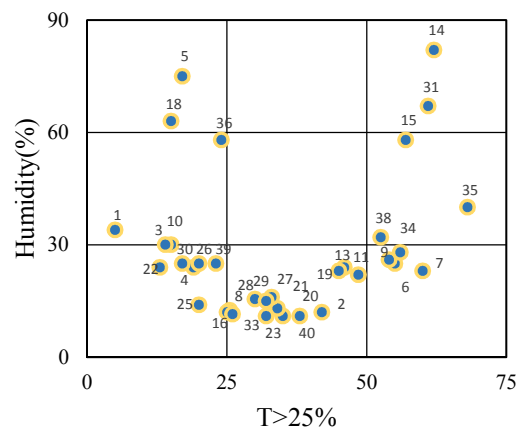
در ابتدا برای بررسی قابلیت اطمینان و اعتبارسنجی روش تحلیلی به کار گرفته شده، بازده کلکتور خورشیدی با نتایج تجربی لیانگ [۸] و تیان [۱۷] مقایسه می شود. شکل (۵) نمودار بازده حررتی کلکتور برحسب نسبت اختلاف دمای متوسط سیال و دمای هوا بر شدت تشعشع، $(T_f - T_a)/I_0$ را نشان می دهد که در تشعشع خورشیدی W/m^2 $I_0 = 950$ به دست آمده است. کار تیان [۱۷] کاری قدیمی تر نسبت به لیانگ [۸] است. در مرجع [۷] اشاره شده است که احتمالاً به دلیل درست ساخته نشدن کلکتور در مرجع [۱۷] بازده حررتی آن پایین است. به خصوص در صورتی که فاصله فین با لوله جاذب (لوله داخلی) زیاد باشد، مقاومت لایه هوای بین آن ها می تواند بازده حررتی را تا این مقدار کاهش دهد. مقادیر مرجع ۷ به واقعیت نزدیک تر است چیزی که در نوع تجاری این کلکتور نیز مشاهده می شود. همان طور که شکل نشان می دهد، نتایج بازده در کار حاضر، روند نزولی طی شده را مطابق با کار تجربی لیانگ با اختلاف کمی در مقادیر نشان می دهد و این امر نشان دهنده دقت قابل قبول مدل یک بعدی برای بررسی عملکرد حررتی کلکتور لوله خلأ با لوله U شکل است.

(۴۱۲ تا ۴۶۲ وات بر متر مربع) مانند همدان و شهرهای دارای تشعشع کم (۲۹۳ تا ۴۱۲ وات بر متر مربع) مانند بندر انزلی و اردبیل.



شکل (۳): اطلس خورشیدی ارائه شده برای ایران توسط علمداری و همکاران [۲۰]

همین تقسیم بندی را می توان برای دمای هوا انجام داد. برای مثال بر اساس تعداد ساعتی که دمای هوا بالاتر از 25°C است، شهر انزلی (دمای متوسط این ساعات $27/37^{\circ}\text{C}$) که کمتر از ۲۵٪ ساعات، دمای آن بیش از 25°C بوده است سرد، شهر کرمان ($30/23^{\circ}\text{C}$) که بین ۲۵ تا ۵۰٪ ساعات آن بیش از 25°C بوده است نیمه گرم و شهر اهواز ($34/95^{\circ}\text{C}$) با بیش از ۷۵٪ ساعات بیشتر از 25°C ، اقلیم گرم محسوب می شود. این تقسیم بندی در شکل (۴) نشان داده شده است؛ که البته بر اساس رطوبت و دمای هوا اقلیم های ایران به ۹ قسمت تقسیم می شوند. اما دو پارامتر مد نظر ما تشعشع خورشیدی و دمای محیط هستند. با مقایسه شکل (۳) و (۴) مشاهده می شود شهرهایی که تشعشع خورشیدی بیشتری دارند، شهرهای گرم تر نیز هستند. به عبارت دیگر، می توان با در نظر گرفتن سه اقلیم در مبحث خورشیدی، کل ایران را پوشش داد.

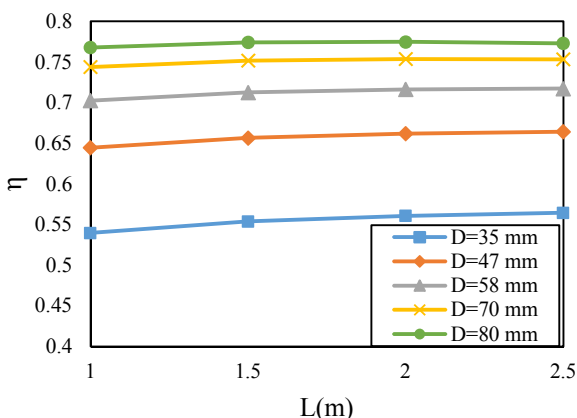


شکل (۴): تقسیم بندی شهرها بر اساس معیار تعداد ساعات دمای بیش از 25°C [۲۱]

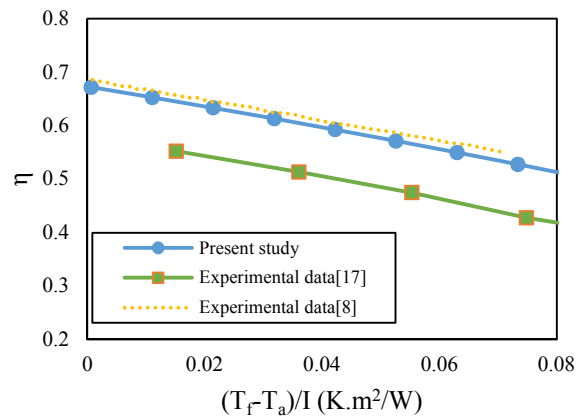
جدول (۲): تشعشع متوسط و دمای متوسط برای چهار شهر

| شهر | کرمان | بوشهر | همدان | بندر انزلی |
|---|-------|-------|-------|------------|
| تشعشع کل متوسط ماهیانه ($\frac{KWh}{m^2}$) | ۲۳۹ | ۲۳۰ | ۲۱۱ | ۱۶۲ |
| دمای متوسط هوا ($^{\circ}C$) | ۱۷/۶ | ۲۵/۱ | ۱۲/۰۵ | ۱۶/۰۶ |
| ساعات تابش (h) | ۳۱۶۸ | ۳۱۰۸ | ۲۹۸۸ | ۱۹۸۰ |

دو پارامتر برای مشخص شدن اندازه کلکتور، قطر و طول لوله هستند که بر روی بازده حرارتی و نیز هزینه تولید اثرگذارند. عموماً تصور می‌شود هرچه طول و قطر لوله بزرگ‌تر باشد، منجر به بازدهی بیشتر خواهد شد. با توجه به اینکه، مطالعات کمی بر این موضوع متمرکز شده‌اند، یافتن روند تغییرات بازده به صورت تابعی برحسب اندازه لوله حائز اهمیت است. گفتنی است برای مقایسه دقیق‌تر، فاصله بین دو لوله شیشه‌ای و ضخامت آن‌ها با افزایش قطر ثابت است. همان‌طور که از نمودارهای شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود با افزایش قطر، بازده متوسط افزایش می‌یابد. همچنین در قطر مشخص با افزایش طول، بازده افزایش پیدا می‌کند اما در طول‌های بزرگ‌تر از ۲ متر این افزایش بسیار کم است. نکته جالب توجه این است که در قطرهای ۷۰ و ۸۰ میلی‌متری با افزایش طول به ۲/۵ متر بازده کاهش پیدا می‌کند. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش قطر، افزایش بازده کمتر می‌شود تا آنجایی که می‌بینیم اختلاف بازده بین قطر ۷۰ و ۸۰ میلی‌متری نسبت به قطر ۵۸ و ۷۰ کمتر است.



شکل (۶): بازده متوسط برحسب قطرها و طول‌های مختلف لوله برای شهر کرمان



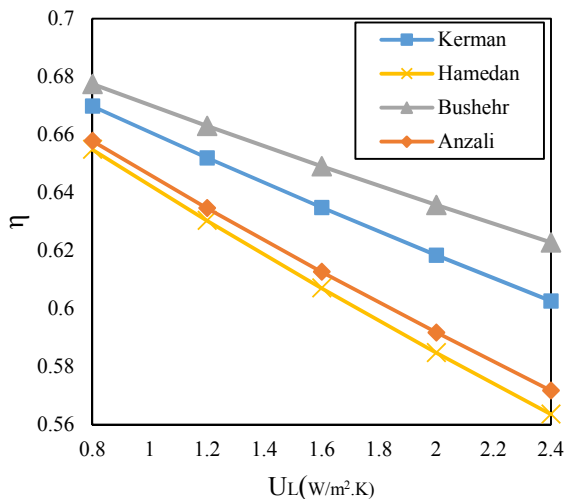
شکل (۵): تغییرات بازده کلکتور برحسب اختلاف دمای متوسط سیال

۴. نتایج و بحث

مدل ارائه شده را می‌توان برای تحلیل پارامترها استفاده کرد. معمولاً تحلیل پارامترها در مراجع بر اساس یک شهر و به صورت پایا انجام شده که عملکرد واقعی سیستم را منعکس نمی‌کند. در تحلیل دستگاه‌های خورشیدی شرایط آب‌وهوایی، پارامتری مهم است. به این منظور و برای لحاظ کردن این پارامتر، تحلیل دینامیکی برای چهار شهر کرمان، بوشهر، همدان و بندر انزلی که دارای خصوصیات آب‌وهوایی و تشعشع خورشیدی متفاوت‌اند، انجام شده است. به این ترتیب در بازه کل سال، به صورت ساعتی عملکرد کلکتور لوله خلا مورد بررسی قرار گرفته است. برای داده‌های هواشناسی شهرهای فوق از داده‌های نرم‌افزار متونورم [۲۳] برای بازه بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ استفاده شده که بر اساس این داده‌ها، میانگین سالیانه تابش کل ساعتی^۱ و دمای محیط متوسط محاسبه و برای مقایسه در جدول (۲) ارائه شده است. روش کار بدین صورت است که داده‌های هواشناسی مورد نیاز اعم از تشعشع خورشیدی کل، دمای هوا و... به صورت ساعتی توسط برنامه کامپیوتری، فراخوانی شده و دمای خروجی کلکتور به دست می‌آید و با استفاده از این دما و دمای سیال ورودی به کلکتور می‌توان حرارت دریافتی مفید را محاسبه کرد. با توجه به اینکه مساحت کلکتور در طول و قطرهای مختلف تغییر می‌کند، به منظور مقایسه عملکرد کلکتور در چهار شهر مذکور، از پارامتر بازده سالیانه کلکتور در طول سال استفاده شده است. این پارامتر به صورت نسبت حرارت دریافتی کلکتور در طول سال به میزان تشعشع ورودی به آن تعریف می‌شود.

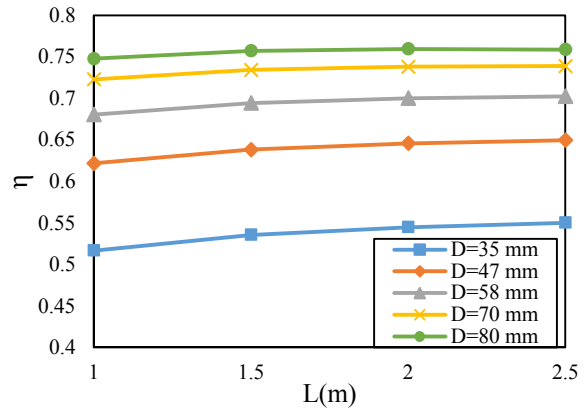
$$\bar{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^{8760} Q_i}{A \sum_{i=0}^{8760} I_i} \quad (15)$$

1. Meteonorm
2. Yearly Average of Hourly Global Solar Radiation



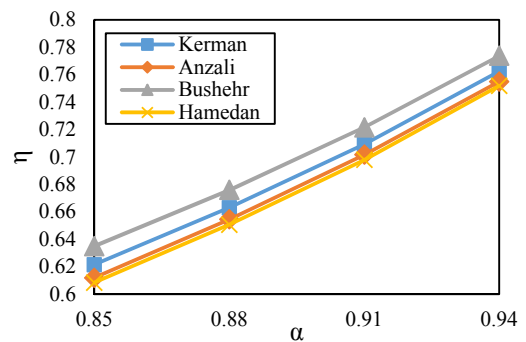
شکل (۹): نمودار بازده حرارتی برحسب ضریب اتلاف حرارتی برای چهار شهر مختلف

به طور مشابه، بندر انزلی که تشعشع کمتری نسبت به همدان دارد اما بازده حرارتی آن بیشتر از شهر همدان است. علت این امر دمای متوسط محیط پایین تر شهر همدان است. شکل (۹) نمودار تغییرات بازده برحسب ضریب اتلاف حرارتی برای چهار شهر کرمان، بوشهر، بندر انزلی و همدان را نمایش می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش ضریب اتلاف حرارت، بازده کاهش پیدا می کند. شیب نمودار برای شهرهای بندر انزلی و همدان که سردسیر هستند بیشتر از شهرهای کرمان و بوشهر است و این نشان دهنده این است که شهرهای با اقلیم سرد بیشتر تحت تأثیر افزایش ضریب اتلاف حرارت قرار می گیرند. علت افزایش اختلاف بین مقادیر با افزایش ضریب اتلاف حرارت را می توان بدین صورت توجیه کرد که بازده حرارتی نسبت انرژی مفید ورودی به تشعشع خورشیدی ورودی است. تشعشع ورودی به کلکتور در چهار شهر متفاوت است و با افزایش ضریب اتلاف حرارت تغییر نمی کند. این صورت کسر است که مرتب کاهش پیدا می کند. در نتیجه با کاهش انرژی دریافتی مفید آن شهرهایی که تشعشع کمتری دارند، بیشتر تحت تأثیر کاهش بازده هستند.

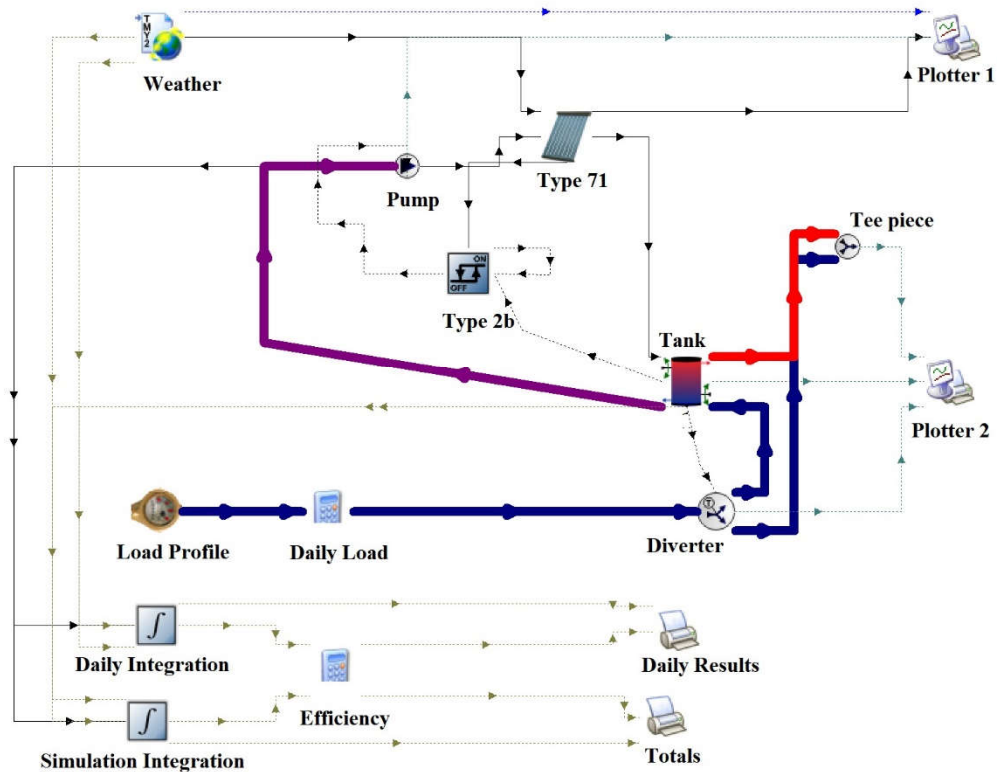


شکل (۷): بازده متوسط برحسب قطرها و طول های مختلف لوله برای شهر همدان

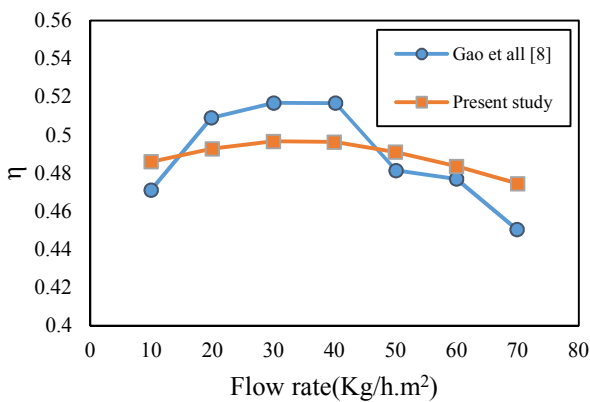
شکل (۸) بازده حرارتی برحسب ضریب جذب برای چهار شهر کرمان، همدان، بندر انزلی و بوشهر را نشان می دهد. بر اساس این نتایج مشاهده می شود با افزایش ضریب جذب، α بازده حرارتی افزایش پیدا می کند. روند افزایش بازده برای هر چهار شهر یکسان است و هیچ اختلافی در شیبها وجود ندارد. با توجه به شکل، بیشترین و کمترین بازده به ترتیب متعلق به شهر بوشهر و همدان است. هر دو پارامتر تشعشع خورشیدی و دمای محیط در بازدهی حرارتی یک کلکتور نقش اساسی دارند. اینکه نقش هریک برای هر نوع کلکتور به چه صورت است، نیاز به کمی سازی دارد. همان طور که از شکل (۸) مشاهده می شود، به رغم اینکه بوشهر تشعشع کمتری نسبت به کرمان دارد، اما بازده حرارتی کلکتور در شرایط اقلیمی بوشهر بیشتر است. علت این امر بالاتر بودن دمای متوسط محیط یا کمتر بودن اتلاف حرارتی در این شرایط است.



شکل (۸): بازده حرارتی برحسب ضریب جذب های مختلف برای چهار شهر



شکل (۱۰): مدل سیکل کلکتور خورشیدی لوله‌ خلاء در نرم‌افزار ترنسیس



شکل (۱۱): بازده حرارتی برحسب ضریب جذب‌های مختلف برای چهار شهر

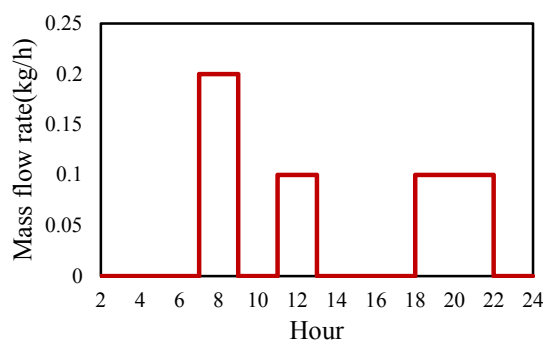
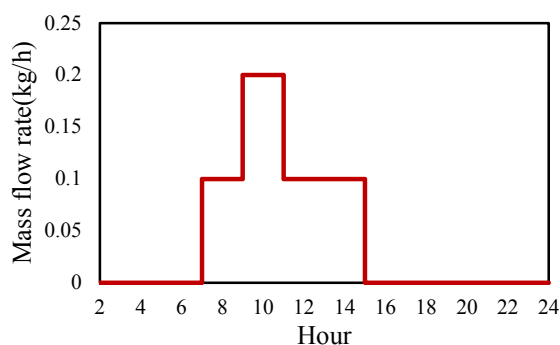
در این مدل که به‌منظور گرمایش آب مصرفی ساختمان در نظر گرفته شده، کنترل پمپ به روش کنترلی اختلاف دما انجام می‌شود. استراتژی کنترل بدین صورت است که اگر اختلاف دمای کلکتور کمتر از اختلاف دمای حداکثر (ΔT_H) شود، پمپ روشن شده و اگر اختلاف دمای کلکتور بیشتر از اختلاف دمای حداقل (ΔT_L) شود، پمپ خاموش می‌شود. اختلاف دمای کلکتور همان اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال عامل است. در این مطالعه، اختلاف دمای حداکثر $\Delta T_H = 10$ و $\Delta T_L = 2$ مساحت کلکتور ۵ متر مربع و زاویه شیب آن ۳۰ درجه

یکی دیگر از پارامترهای مهم طراحی کلکتور، دبی جرمی است که بر روی عملکرد آن تأثیر بسزایی دارد. برای بررسی اثر این پارامتر بر روی عملکرد حرارتی کلکتور در اقلیم‌های مختلف، سیکل واقعی شامل کلکتور خورشیدی لوله‌ خلاء، پمپ و منبع ذخیره در نرم‌افزار ترنسیس^۱ مدل‌سازی شده و به روش دینامیکی حرارت دریافتی مفید از کلکتور در ۸۷۶۰ ساعت در طول سال به دست آمده و در دبی‌های جرمی از ۱۰ تا ۷۰ کیلوگرم بر ساعت در چهار شهر کرمان، بوشهر، بندر انزلی و همدان با هم مقایسه شده است. شکل (۱۰) مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار ترنسیس را نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی این قسمت، نتایج با کار گائو و همکاران [۹] مقایسه و در شکل (۱۱) ارائه شده است. این نتایج برای شهر پکن و برای بازه ۱۵ نوامبر تا ۱۵ مارس است. همان‌طور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، مقادیر دو مطالعه اختلاف اندکی (کمتر از دو درصد) با هم دارند. البته باید بدین نکته توجه کرد پروفیل بار در مطالعه گائو مشخص نیست؛ بنابراین می‌توان علت اختلاف را این دانست.

1.Trnsys

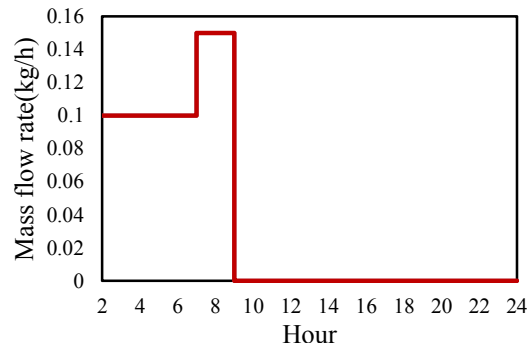
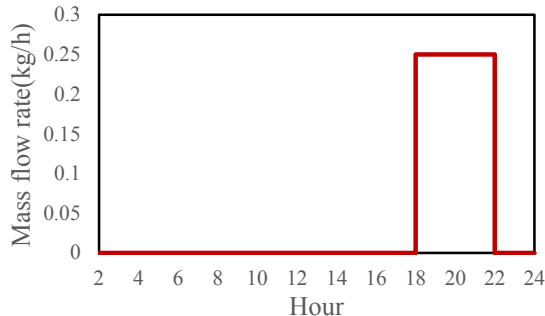
پروفیل‌های بار مختلف است. علت این پدیده احتمالاً این است که با توجه به اینکه بار در ساعات مختلف صورت می‌گیرد، دمای مخزن در توزیع بارهای مختلف متفاوت است. در نتیجه، کلکتور خورشیدی که ورودی آن از مخزن ذخیره گرفته می‌شود، در توزیع بارهای مختلف دمای متفاوتی داشته است؛ بنابراین اتلاف حرارتی متفاوتی خواهد داشت. می‌توان از شکل نتیجه گرفت که بازده کلکتور در یک نقطه و فارغ از نحوه توزیع بار بهینه بوده و آن نقطه در دبی ۵۰ کیلوگرم بر ساعت بر واحد سطح است و فقط به خصوصیات کلکتور و شرایط آب‌وهوایی بستگی دارد. بنابراین به‌منظور به دست آوردن دبی بهینه برای شهرهای دیگر به توزیع بار حالت اول اکتفا می‌شود.

است. برای بررسی تأثیر توزیع بار بر دبی جرمی، چهار پروفیل بار مختلف در طول شبانه‌روز انتخاب و در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. شکل (۱۳) نمودار بازده برحسب دبی جرمی را برای چهار شهر نشان می‌دهد. قسمت الف شکل مربوط به شهر کرمان است که نمودار بازده برحسب دبی جرمی را برای چهار توزیع بار مختلف در طول شبانه‌روز به نمایش گذاشته است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، برای هر چهار پروفیل بار، بازده ابتدا افزایش، به یک نقطه ماکزیمم رسیده و سپس کاهش پیدا می‌کند. نکته مهم این است که دبی جرمی بهینه برای هر چهار توزیع در یک نقطه اتفاق می‌افتد. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، تفاوت بازده یا حرارت دریافتی مفید از کلکتور در



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

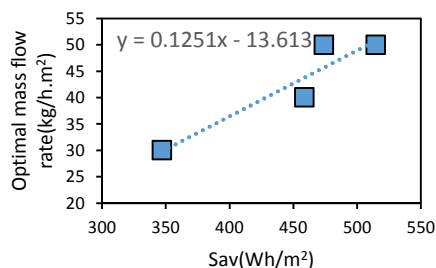
شکل (۱۲): پروفیل‌های بار مختلف در یک شبانه‌روز

ساعت بر واحد سطح اتفاق می‌افتد؛ به عبارت دیگر، بیشینه نمودار نسبت به شهر کرمان در دبی کمتری اتفاق افتاده است؛ که علت آن تفاوت در اقلیم آب‌وهوایی دو شهر است.

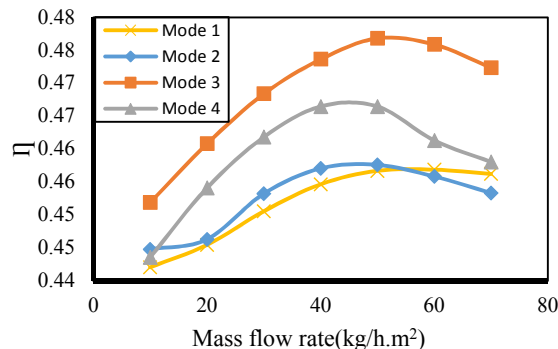
نمودار (۱۳-ب) بازده سالیانه برحسب دبی جرمی را برای شهر همدان نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل استنباط می‌شود، روند تغییرات بازده برحسب دبی جرمی برای این شهر با آنچه برای شهر کرمان اتفاق افتاد یکسان است، اما بیشینه نمودار در دبی ۴۰ کیلوگرم بر

تشعشع خورشیدی کل متوسط بالاتری دارند، بازده بیشینه در مقادیر دبی جرمی بالاتری اتفاق می‌افتد؛ زیرا با افزایش تشعشع خورشیدی دمای متوسط سیال در کلکتور افزایش پیدا می‌کند، در نتیجه اختلاف دمای متوسط کلکتور و محیط افزایش پیدا می‌کند و در نهایت بازده کلکتور کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از کاهش بازده می‌توان دبی کلکتور را افزایش داد. اما افزایش بیش از حد دبی منجر به کاهش بازده است؛ زیرا فرصت لازم برای انتقال حرارت داده نشده و انرژی دریافتی مفید کاهش پیدا می‌کند. بنابراین برای هر اقلیم یک دبی بهینه وجود دارد. در بررسی تأثیر دبی بر کلکتور در حالت پایا، با افزایش دبی، بازده حرارتی به دلیل کاهش متوسط دمای ورودی و خروجی سیال، مرتب افزایش پیدا می‌کند این در حالی است که در نتایج به دست آمده بازده بعد از افزایش دچار روند کاهشی می‌شود. کاهش بازده با افزایش دبی زمانی توجیه ندارد که دمای ورودی به کلکتور ثابت باشد نکته‌ای که باید بدان توجه کرد، این است که ورودی کلکتور از خروجی مخزن گرفته شده و عملکرد مخزن بر روی کلکتور تأثیر می‌گذارد؛ به عبارت دیگر، دمای ورودی مخزن ثابت نیست و با افزایش دبی به دلیل اینکه فرصت انتقال حرارت سیال با سیال داخل مخزن کمتر می‌شود، دمای خروجی از مخزن کمتر کاهش یافته و دمای ورودی به کلکتور افزایش خواهد یافت. پس در تحلیل دینامیکی با دو اثر متضاد مواجهیم: اثر اول کاهش دمای خروجی سیال به تبع آن دمای متوسط سیال است و دیگر اثر، افزایش دمای ورودی سیال به دلیل کمتر کاهش پیدا کردن آن در مخزن است. که این دو اثر متضاد هستند. که ابتدا اثر اول بیشتر از اثر دوم بوده اما با افزایش دبی اثر دوم غلبه کرده و باعث کاهش بازده خواهد شد و اینجا یک نقطه بهینه وجود دارد.

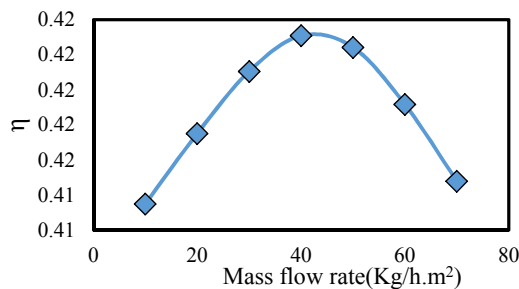
اگر مقادیر دبی بهینه برای بازده ماکزیمم برای چهار شهر کرمان، همدان، بندر انزلی و بوشهر برحسب شدت تشعشع در یک شکل نشان داده شود، معادله‌ای برای تغییرات نمودار دبی بهینه برحسب تشعشع خورشیدی کل متوسط به دست می‌آید. شکل (۱۴) این تغییرات را همراه با بهترین منحنی خطی که کمترین اختلاف را با نقاط داده شده دارد نشان می‌دهد.



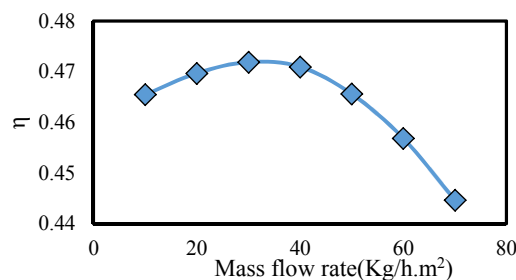
شکل (۱۴): نمودار دبی بهینه برحسب تشعشع خورشیدی کل متوسط سالیانه



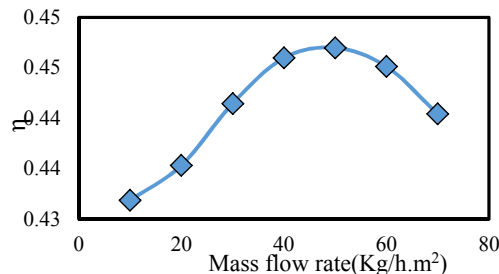
الف



ب



ج



د

شکل (۱۳): نمودار بازده برحسب دبی جرمی الف. کرمان؛ ب. همدان؛ ج. بندر انزلی؛ د. بوشهر

در شکل (۱۳) نمودار بازده سالیانه برحسب دبی جرمی برای شهر بندر انزلی را نشان داده شده است. روند تغییرات بازده برحسب دبی مشابه حالت‌های قبلی است با این تفاوت که نقطه بیشینه بازده دبی ۳۰ کیلوگرم بر ساعت بر متر مربع است. شکل (۱۳-د) نمودار بازده سالیانه برحسب دبی جرمی برای شهر بوشهر را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل قابل مشاهده است، تغییرات بازده سالیانه برحسب دبی روند مشابهی با حالت‌های قبل دارد با این تفاوت که دبی برای بازده سالیانه بیشینه در حالت ۵۰ کیلوگرم بر ساعت بر واحد سطح اتفاق می‌افتد. با دقت در نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت که شهرهایی که

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه، عملکرد حرارتی یک کلکتور خورشیدی لوله‌خلاف با لوله U مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ریاضی استفاده شده یک مدل تحلیلی یک‌بعدی بر اساس موازنه انرژی برای اجزای مختلف کلکتور و بر پایه روش شبکه مقاومت‌های حرارتی بود. سپس تأثیر پارامترهای مهم طراحی شامل اندازه لوله، ضریب جذب جاذب، ضریب اتلاف حرارتی کل و دبی جرمی بر عملکرد حرارتی کلکتور به روش دینامیکی برای اقلیم‌های مختلف بررسی شد.

اثر دبی جرمی بر عملکرد کلکتور برای چهار شهر کرمان، بوشهر، بندر انزلی و همدان بررسی و مشخص شد که برای دبی جرمی بهینه برای اقلیم‌های مختلف، مقادیر متفاوتی به دست می‌آید و این مقدار با تشعشع خورشیدی متوسط سالیانه رابطه مستقیم دارد؛ به عبارت دیگر، هرچه تشعشع خورشیدی کل متوسط سالیانه افزایش پیدا کند، مقدار دبی بهینه برای کلکتور خورشیدی افزایش پیدا می‌کند. بر این اساس رابطه‌ای برای دبی جرمی بهینه برحسب تشعشع متوسط خورشیدی ارائه شد. اثر توزیع بار بر دبی جرمی بهینه مورد بررسی قرار گرفت و به نظر می‌رسد که توزیع بار تأثیری بر دبی جرمی بهینه ندارد و این پارامتر فقط تابعی از خصوصیات کلکتور و اقلیم است.

در مورد اندازه کلکتور، افزایش طول لوله‌خلاف بیشتر از ۲ متر تأثیر چندانی بر روی افزایش بازدهی ندارد و بازده حرارتی کلکتور در طول ثابت با افزایش قطر افزایش پیدا می‌کند؛ اگرچه این افزایش بازده به تدریج با افزایش قطر کاهش پیدا می‌کند.

فهرست علائم

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| h | ضریب انتقال حرارت ($W/m^2.K$) |
| I | تشعشع ورودی (W/m^2) |
| L | طول لوله (m) |
| M | دبی جرمی (kg/s) |
| P | محیط (m) |
| Q | انتقال حرارت (W) |
| q'' | شار انتقال حرارت (W/m^2) |
| R | مقاومت حرارتی ($m.K/W$) |
| T | دما (K) |
| U | ضریب انتقال حرارت کلی ($W/m^2.K$) |
| علائم یونانی | |
| α | ضریب جذب |
| ϵ | ضریب صدور |
| η | بازده حرارتی |
| $\bar{\eta}$ | بازده حرارتی متوسط |
| λ | ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$) |
| زیرنویس | |
| a | اتمسفر |
| b | پایه فین |
| c | مکانیزم انتقال حرارت هدایتی |
| f | سیال |
| fin | فین |
| g | لوله شیشه‌ای بیرونی |
| in | ورودی لوله |
| L | از دست رفته کل |
| mid | وسط لوله U |
| out | خروجی لوله |
| p | جاذب |
| r | مکانیزم انتقال حرارت تشعشعی |
| u | مفید |

| | |
|------|-------------------------|
| A | مساحت (m^2) |
| C | هدایت‌پذیری ($W/m.K$) |
| D | قطر (m) |
| d | قطر لوله U (m) |
| F | بازدهی فین |
| F' | عامل بازدهی کلکتور |

جدول (۳): میانگین دمای ایستگاه‌های هواشناسی در ساعات گرم‌تر از ۲۵ °C [۲۱]

| ایستگاه هواشناسی | میانگین دما | ایستگاه هواشناسی | میانگین دما | ایستگاه هواشناسی | میانگین دما | ایستگاه هواشناسی | میانگین دما |
|--------------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------------|-------------|------------------|-------------|
| ۱. اردبیل | ۲۷/۷۸ | ۱۱. بهبهان | ۳۴/۳۲ | ۲۱. زرین شهر | ۳۱/۱۲ | ۳۱. قشم | ۳۱/۰۷ |
| ۲. اردستان | ۳۲/۲۴ | ۱۲. تبریز | ۲۹/۲۲ | ۲۲. زنجان | ۲۸/۹۴ | ۳۲. کاشان | ۳۱/۹۱ |
| ۳. ارومیه | ۲۸/۵۹ | ۱۳. جهرم | ۳۳/۶۲ | ۲۳. سررود کرمانشاه | ۳۱/۵۲ | ۳۳. کرمان | ۳۰/۲۳ |
| ۴. اسلام‌آباد (کرمانشاه) | ۲۹/۱۰ | ۱۴. چابهار | ۲۸/۷۱ | ۲۴. سمنان | ۳۰/۸۸ | ۳۴. کنگان جم | ۳۳/۰۴ |
| ۵. اندلی | ۲۷/۳۷ | ۱۵. خارک | ۳۱/۹۲ | ۲۵. سنندج | ۳۰/۷۶ | ۳۵. گاوندی | ۳۴/۱۵ |
| ۶. اهواز | ۳۴/۵۹ | ۱۶. خرم‌آباد | ۳۱/۱۲ | ۲۶. شاهرود | ۲۹/۱۳ | ۳۶. گرگان | ۲۸/۹۵ |
| ۷. ایرانشهر | ۳۴/۳۷ | ۱۷. خیرآباد | ۲۸/۹۴ | ۲۷. شیراز | ۳۱/۱۱ | ۳۷. گل‌مکان | ۲۹/۰۹ |
| ۸. ایلام | ۳۰/۴۶ | ۱۸. رشت | ۳۱/۵۲ | ۲۸. فرودگاه امام‌خیمینی | ۳۱/۵۲ | ۳۸. ماهشهر | ۳۳/۹۷ |
| ۹. آبادان | ۳۴/۵۶ | ۱۹. زابل | ۳۰/۸۸ | ۲۹. قائن | ۲۹/۲۹ | ۳۹. مشهد | ۳۰/۰۳ |
| ۱۰. بجنورد | ۲۹/۰۱ | ۲۰. زاهدان | ۳۰/۷۶ | ۳۰. قزوین | ۳۰/۲۵ | ۴۰. یزد | ۳۱/۶۷ |

مراجع

- [1] *Solar Heat Worldwide*. IEA SHC, 2017.
- [2] Window, B. and Zybert, J., "Optical Collection Efficiencies of Arrays of Tubular Collectors with Diffuse Reflectors", *Solar Energy*, Vol. 26, No. 4, pp. 325-331, 1981.
- [3] Harding, G.L., Zhiqiang, Y. and Mackey, D.W., "Heat Extraction Efficiency of a Concentric Glass Tubular Evacuated Collector", *Solar Energy*, Vol. 35, No. 1, pp. 71-79, 1985.
- [4] Morrison, G.L., Budihardjo, I. and Behnia, M., "Water-in-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters", *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1, pp. 135-140, 2004.
- [5] Sadeghzadeh, M.A., "Promotion the Efficiency of Thermosyphon Solar-Electrical Water Heaters Using a Daily Scheduled Timer Key", *Energy: Engineering & Management*, Vol. 9, No. 3, pp. 98-107, 2019.
- [6] Kim, Y. and Seo, T., "Thermal Performances Comparisons of the Glass Evacuated Tube Solar Collectors with Shapes of Absorber Tube", *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 5, pp. 772-795, 2007.
- [7] Ma, L., Lu, Z., Zhang, J. and Liang, R., "Thermal Performance Analysis of the Glass Evacuated Tube Solar Collector with U-Tube", *Building and Environment*, Vol. 45, No. 9, pp. 1959-1967, 2010.
- [8] Liang, R., Ma, L., Zhang, J. and Zhao, D., "Theoretical and Experimental Investigation of the Filled-Type Evacuated Tube Solar Collector with U Tube", *Solar Energy*, Vol. 85, No. 9, pp. 1735-1744, 2011.
- [9] Gao, Y., Zhang, Q., Fan, R., Lin, X. and Yu, Y., "Effects of Thermal Mass and Flow Rate on Forced-Circulation Solar Hot-Water System: Comparison of Water-in-Glass and U-Pipe Evacuated-Tube Solar Collectors", *Solar Energy*, Vol. 98, Part C, pp. 290-301, 2013.
- [10] Mishra, R.K., Garg, V. and Tiwari, G.N., "Thermal Modeling and Development of Characteristic Equations of Evacuated Tubular Collector (Etc)", *Solar Energy*, Vol. 116, Supplement C, pp. 165-176, 2015.
- [11] Mishra, R.K., Garg, V. and Tiwari, G.N., "Energy Matrices of U-Shaped Evacuated Tubular Collector (Etc) Integrated with Compound Parabolic Concentrator (Cpc)", *Solar Energy*, Vol. 153, Supplement C, pp. 531-539, 2017.
- [12] Nie, X., Zhao, L., Deng, S. and Lin, X., "Experimental Study on Thermal Performance of U-Type Evacuated Glass Tubular Solar Collector with Low Inlet Temperature", *Solar Energy*, Vol. 150, pp. 192-201, 2017.
- [13] Abokersh, M.H., El-Morsi, M., Sharaf, O. and Abdelrahman, W., "On-Demand Operation of a Compact Solar Water Heater Based on U-Pipe Evacuated Tube Solar Collector Combined with Phase Change Material", *Solar Energy*, Vol. 155, pp. 1130-1147, 2017.
- [14] Naik, B.K., Bhowmik, M. and Muthukumar, P., "Experimental Investigation and Numerical Modelling on the Performance Assessments of Evacuated U – Tube Solar Collector Systems", *Renewable Energy*, Vol. 134, pp. 1344-1361, 2019.
- [15] Korres, D.N., Tzivanidis, C., Koronaki, I.P. and Nitsas, M.T., "Experimental, Numerical and Analytical Investigation of a U-Type Evacuated Tube Collectors' Array", *Renewable energy*, Vol. 135, pp. 218-231, 2019.
- [16] Çengel, Y.A. Ghajar, A.J., *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill, pp. 753, 2011.
- [17] Tian, Q., "Thermal Performance of the U-Type Evacuated Glass Tubular Solar Collector", *Building Energy & Environment*, Vol. 26, pp. 51-59, 2007.
- [18] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, 2013.
- [19] Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill, pp. 489, 2011.
- [20] Alamdari, P., Nematollahi, O. and Alemrajabi, A.A., "Solar Energy Potentials in Iran: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 778-788, 2013.

[۲۱] مطالعه فنی و اقتصادی روش‌های کاهش دمای توربین گاز

مدل v94.2، شرکت مپنا، ۱۳۹۲.

[22] American Society of Heating, R. Air-Conditioning, E.,
"2015 Ashrae Handbook : Heating, Ventilating, and
Air-Conditioning Applications", 2015.

[23] *Meteonorm Software*; Available from:
<http://www.meteonorm.com/>.