

بررسی تأثیر الگوی مصرف آب گرم بر کارایی سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی

مهسا خاوری^{۱*}، فرزاد ویسی^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

khavarimahsa@gmail.com

^۲ دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

veysi@razi.ac.ir

چکیده: در این مقاله سیستم آبگرمکن خورشیدی گردش اجباری با کلکتورهای صفحه تخت و نیز لوله خلأ، برای الگوهای مختلف مصرف آب گرم، شبیه‌سازی شده است. الگوهای مطالعه‌شده در این پژوهش، نمونه‌های واقعی از الگوهای مصرف آب گرم برای مراکز و مؤسسات مختلف هستند. به منظور ارزیابی تأثیر الگوهای مصرف آب گرم بر کارایی اقتصادی سیستم، خروجی‌های شبیه‌سازی دینامیکی کارایی حرارتی به‌عنوان ورودی، برای تحلیل اقتصادی آبگرمکن خورشیدی به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که به‌کارگیری الگوهایی که مقدار زیادی از مصرف آب گرم را به ساعات ۶ تا ۱۰ صبح اختصاص می‌دهند، هزینه ناشی از تأمین انرژی مورد نیاز سیستم جبرانی را افزایش می‌دهد. در نتیجه، دوره بازگشت سرمایه سیستم نیز، افزایش می‌یابد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، تغییر الگوی مصرف آب گرم در سیستم با کلکتورهای صفحه تخت و لوله خلأ، می‌تواند به طور متوسط، سوددهی سالانه سیستم را به ترتیب ۶۱ درصد و ۳۱ درصد افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوی مصرف آب گرم، سیستم آبگرمکن خورشیدی، کلکتور صفحه تخت، کلکتور لوله خلأ.

* نویسنده مسئول

در سیستم جبرانی، می‌تواند کارایی فنی و اقتصادی آبگرمکن خورشیدی را ارتقاء دهد. تعیین مقدار بازگشت سرمایه سیستم‌های خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های معمولی و همچنین، تعیین دوره بازگشت سرمایه، برای آگاهی یافتن از کارایی اقتصادی این سیستم‌ها، لازم می‌باشند و این موارد توابعی از نرخ تورم، نرخ تنزیل بازار، قیمت سوخت، هزینه خرید اولیه تجهیزات خورشیدی، هزینه تعمیر و نگهداری سیستم و نرخ افزایش این هزینه هستند. مطالعات زیادی در زمینه تحلیل کارایی سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی، انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

نسپولینی و روزر، قابلیت‌های فنی و اقتصادی سیستم آبگرمکن خورشیدی را برای استفاده در منازل مسکونی با ساکنین کم‌درآمد، ارزیابی کردند [۵]. آن‌ها مصرف برق ۶۰ واحد مسکونی نمونه را که مجهز به سیستم آبگرمکن خورشیدی بودند و ۳۰ واحد دیگر را که آب گرم آن‌ها توسط سیستم گرمایش الکتریکی معمولی تأمین می‌شد، مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی به طور متوسط، سالانه ۳۸ درصد در مصرف برق صرفه‌جویی می‌شود و مدت زمان اوج مصرف الکتریسیته ۴۲ درصد کاهش می‌یابد.

در مطالعه انجام شده توسط کااو و همکاران، سیستم آبگرمکن خورشیدی با کلکتورهای لوله خالص برای تأمین آب گرم، طبق یک الگوی مشخص مصرف آب گرم، طراحی شد که توسط برنامه TRNSYS، کارایی حرارتی سیستم به طور دینامیکی شبیه‌سازی شد و تحلیل اقتصادی انجام گرفت [۶]. مطابق نتایج، انرژی کمکی بویلر در فصل زمستان، به‌طور مکرر و به مقدار زیاد، مورد نیاز است و کسر خورشیدی سالانه سیستم ۵۶ درصد اعلام شد. ایشان عنوان کردند که سیستم آبگرمکن خورشیدی در مقایسه با سیستم گرمایش آب معمولی گازی، کارایی اقتصادی بالاتری دارد و دوره بازگشت سرمایه معادل ۷/۴ سال را دارا می‌باشد.

در مطالعه‌ای دیگر، هازامی و همکاران، پتانسیل آبگرمکن‌های خورشیدی خانگی را در کاهش مصرف گاز و الکتریسیته مورد مطالعه قرار دادند و همچنین، فواید محیطی استفاده از این سیستم‌ها را در تونس بررسی کردند [۷]. ایشان فقط از یک نمونه الگوی مصرف آب گرم خانگی استفاده کردند. مطابق یکی از نتایج شبیه‌سازی، میزان صرفه‌جویی سالانه در مصرف گاز، با استفاده از کلکتورهای صفحه تخت و لوله خالص، به ترتیب معادل ۳۰۶ و ۴۱۰ مترمکعب شد و دوره بازگشت سرمایه هر کدام از سیستم‌ها، به ترتیب معادل ۶ و ۷/۵ سال شد. لیما و

بخش عمده‌ای از مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ساختمان‌ها مربوط می‌شود. تأمین آب گرم مصرفی مورد نیاز ساختمان‌ها، مقدار قابل ملاحظه‌ای، انرژی مصرف می‌کند. در نتیجه، استفاده از آبگرمکن‌های خورشیدی، می‌تواند نقش مهمی هم در ذخیره سوخت‌های فسیلی و هم در کاهش آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد [۱]. ساختمان‌هایی که در آن‌ها، روزانه آب گرم به میزان زیادی مصرف می‌شود مانند هتل‌ها، رستوران‌ها، خوابگاه‌های دانشجویی و بیمارستان‌ها، پتانسیل بیشتری در بهره‌برداری از آبگرمکن‌های خورشیدی دارند.

کلکتورهای خورشیدی، مهم‌ترین جزء سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی هستند که با جذب تابش خورشید و انتقال حرارت، سیال عامل را گرم می‌کنند. تاکنون عوامل مؤثر بر عملکرد کلکتورها از جمله شرایط جغرافیایی و شیب کلکتورها نسبت به افق، توسط محققین بسیاری بررسی شده‌اند [۲]. از میان کلکتورهای خورشیدی، دو نوع صفحه تخت^۱ و لوله خالص^۲، اغلب در کاربردهای گرمایش آب در مقیاس کوچک استفاده می‌شوند. کلکتورهای لوله خالص، راندمان حرارتی بالاتری دارند و نسبتاً ارزان‌تر هستند. در این کلکتورها به دلیل وجود خالص میان دو لوله داخلی و خارجی تشکیل‌دهنده، اتلاف‌های گرمایی ناشی از انتقال حرارت جابجایی و هدایت کاهش یافته و به همین دلیل در شرایط محیطی نامساعد، مثلاً در روزهای ابری، سرد و طوفانی، کلکتورهای لوله خالص، مناسب‌تر از کلکتورهای صفحه تخت می‌باشند [۳]. مزیت دیگر کلکتورهای لوله خالص، نسبتاً غیر حساس بودن به جهت تابش پرتوهای خورشید می‌باشد؛ در حالی که کلکتورهای صفحه تخت از این مزیت برخوردار نیستند [۴].

سیستم‌های خورشیدی را نمی‌توان فقط بر مبنای کارایی فنی و حرارتی به کار گرفت و حتماً باید بهره اقتصادی آن‌ها را نیز بررسی کرد. به‌طور کلی، فرایندهای خورشیدی با هزینه‌های اولیه بالا و هزینه‌های عملکرد پایین شناخته شده‌اند، بنابراین کارایی اقتصادی سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی، در مقایسه با سیستم‌های گرمایش آب معمولی (غیر خورشیدی) تعیین می‌شوند.

سیستم‌های گرمایش آب خورشیدی دارای سیستم جبرانی با سوخت‌های فسیلی و یا انرژی الکتریکی هستند که برای تأمین نیازهای گرمایش آب در روزهای ابری و روزهایی که تابش خورشید پایین است، به کار گرفته می‌شود. کاهش مصرف سوخت و هزینه ناشی از آن

1. Flat Plate Collector (FPC)
2. Evacuated Tube Collector (ETC)

همکاران، با شبیه‌سازی عددی به مطالعه قابلیت‌های فنی و اقتصادی سیستم گرمایش آب خورشیدی با کلکتورهای صفحه تخت پرداختند [۸]. تحلیل اقتصادی با مقایسه سود سالانه به‌دست‌آمده از سیستم خورشیدی در مقایسه با سیستم گرمایش آب گازی و با روش تحلیل چرخه عمر سیستم^۱، انجام گرفت. ایشان مقادیر مناسب سطح کلکتور، حجم مخزن و نرخ جریان جرمی سیال گذرنده از کلکتور را بر مبنای دستیابی به بیشترین سود سالانه سیستم خورشیدی تعیین کردند؛ با این حال، بررسی‌ها در این تحقیق، صرفاً برای بیمارستانی خاص با یک الگوی مشخص مصرف آب گرم، انجام شدند. در ضمن، برخی از تحقیقات به مقایسه عملکرد سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی گردش اجباری^۲، به دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شبیه‌سازی می‌تواند پیش‌بینی رضایت‌بخشی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه دهد [۹، ۱۰].

تاکنون مطالعات متنوعی جهت برآورد مصارف آب گرم انجام شده است [۱۱-۱۳]. همچنین، مطالعاتی در زمینه تأثیر الگوهای مصرف آب گرم بر میزان کسر خورشیدی سیستم آبگرمکن خورشیدی انجام شده است. مثلاً در تحقیق صورت‌گرفته توسط دونگلینی، به روش مدل دینامیکی تولیدشده توسط برنامه SIMULINK و نیز روش F-chart، کسر خورشیدی سیستم آبگرمکن خورشیدی خانگی با استفاده از سه نوع کلکتور صفحه تخت، کلکتور بدون پوشش شیشه‌ای^۳ و کلکتور لوله خلاء، برای الگوهای ساده‌شده و غیر واقعی مصرف آب گرم، بررسی شد [۱۴]. الگوی اول، مصرف آب گرم را به‌طور یکنواخت، بین ساعات ۲۳ تا ۵ صبح و الگوی دوم، مصرف را به‌طور یکنواخت، بین ساعات ۷ صبح تا ۱۹ متمرکز کرد. طبق نتایج، کسر خورشیدی سیستم در حالت به‌کارگیری الگوی دوم، بالاتر از حالت به‌کارگیری الگوی اول بود.

بوهال و همکاران با شبیه‌سازی، تأثیر نوع کلکتور، شرایط محیطی و الگوی مصرف آب گرم را بر کارایی آبگرمکن‌های خورشیدی گردش اجباری مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. ایشان عنوان کردند که به‌کارگیری الگوی مناسب مصرف آب گرم می‌تواند تقریباً ۴۳ کیلووات ساعت انرژی کمکی سالانه برای سیستم با کلکتور صفحه تخت و ۱۳ کیلووات ساعت انرژی کمکی سالانه برای سیستم با کلکتور لوله خلاء ذخیره کند. در مطالعه دیگری، شیرین‌بخش و همکاران، به بررسی تأثیر مقدار مصرف روزانه آب گرم و نیز تأثیر الگوهای ساعتی مصرف آب گرم بر کارایی سیستم آبگرمکن خورشیدی پرداختند [۱۶]. یکی از الگوهای مطالعه‌شده، نمونه‌ای از الگوی مصرف آب گرم خانگی بود. الگوهای دیگر به ترتیب،

تمرکز یکنواخت مصرف آب گرم در طول ساعات ۵ صبح تا ۲۴ و مصرف ناگهانی آب گرم در ساعاتی خاص را نشان می‌دادند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش مقدار مصرف کلی روزانه آب گرم، تأثیر الگوهای مصرف بر کارایی این سیستم‌ها افزایش می‌یابد. لازم به توجه است که در مطالعاتی که تاکنون ذکر شد، تأثیر الگوها بر کارایی اقتصادی سیستم آبگرمکن خورشیدی مورد مطالعه قرار نگرفت. پیلائی و بانرجی، تأثیر الگوی ساعتی مصرف آب گرم و موقعیت جغرافیایی مکان قرارگیری سیستم آبگرمکن خورشیدی را بر کارایی اقتصادی این سیستم‌ها بررسی کردند [۱۷]. ایشان از یک نمونه الگوی مصرف آب گرم برای منازل مسکونی و یک الگوی مصرف یکنواخت در طول ساعات ۶ صبح تا ۲۰، در شبیه‌سازی استفاده کردند. مطابق یکی از نتایج این تحقیق، در حالتی که اوج مصرف آب گرم در ساعات اوایل صبح باشد، سود حاصل از ذخیره انرژی الکتریکی در سیستم جبرانی آبگرمکن خورشیدی، کمتر از مقدار این سود در حالتی است که مصرف آب گرم به‌طور یکنواخت در نظر گرفته شود.

در اکثر کارهای تحقیقاتی، در شبیه‌سازی‌ها از الگوهای مصرف ساده‌شده و یکنواخت استفاده شده است که اغلب، تقاضای واقعی را به‌درستی نشان نمی‌دهند؛ حال آنکه استفاده از الگوهای واقعی مصرف آب گرم در شبیه‌سازی آبگرمکن‌های خورشیدی می‌تواند نتایج دقیق‌تری را به همراه داشته باشد. از طرفی در اکثر تحقیقات پیشین، الگوهای مربوط به مصرف آب گرم در منازل مسکونی بررسی شده‌اند که به دلیل اختلاف در سبک زندگی خانواده‌ها، میزان تغییرپذیری این الگوها بیشتر از میزان تغییرپذیری الگوهای مراکز تجاری در هر دسته‌ای از کاربردها هست. از این جهت، در این مقاله، با انگیزه‌ی طراحی مناسب و اقتصادی سیستم آبگرمکن خورشیدی در مؤسسات و مراکز تجاری مختلف، با ارائه مدل دینامیکی توصیف‌گر سیستم آبگرمکن خورشیدی گردش اجباری در محیط برنامه SIMULINK، تأثیرات الگوهای مختلف مصرف آب گرم بر کارایی حرارتی و اقتصادی این سیستم‌ها تعیین می‌شوند و با انجام تحلیل اقتصادی، سطح مناسب کلکتورها در هر حالت مشخص می‌شود. همچنین، دو حالت استفاده از کلکتورهای صفحه تخت و کلکتورهای لوله خلاء، مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۲. شبیه‌سازی سیستم آبگرمکن خورشیدی

۱.۲. شرح سیستم

سیستم مورد مطالعه همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، یک آبگرمکن خورشیدی گردش اجباری است. اجزاء این سیستم شامل کلکتورهای خورشیدی (انواع صفحه تخت و لوله خلاء)، پمپ

1. Life Cycle Analysis (LCA)
2. Forced Circulation Solar Water Heater System
3. Unglazed Collector

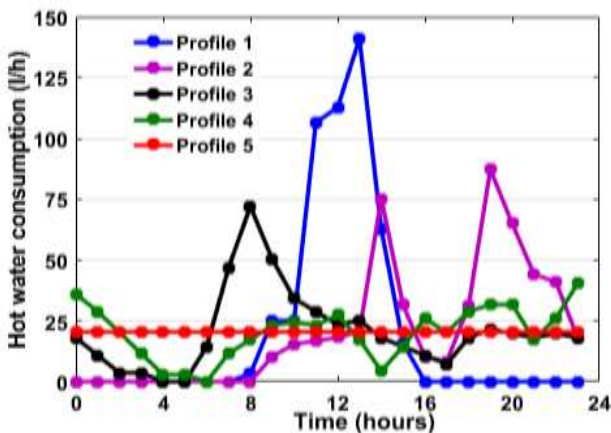
کلکتور و ضریب اتلاف حرارتی کلکتور هستند.

۲.۲. شرایط محیطی

شبیه‌سازی بر مبنای شرایط محیطی شهر کرمانشاه، واقع در عرض جغرافیایی ۳۴/۲۳ درجه و طول جغرافیایی ۴۷/۱ درجه انجام شده است. برای هر ماه یک روز نمونه در نظر گرفته شده است [۱۹] و مقادیر تابش ساعتی برای این روزها محاسبه شده‌اند.

۳.۲. الگوهای مصرف آب گرم

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در این مقاله، از پنج نمونه الگوی مصرف آب گرم برای کاربردهای: (۱) مدرسه ابتدایی (۲) رستوران (۳) متل (۴) خوابگاه دانشجویی پسرانه و (۵) مصرف یکنواخت شبانه‌روزی، استفاده شده است و در همه الگوهای اشاره‌شده، تعداد مصرف‌کننده‌ها طوری انتخاب شده است که همگی مصرف شبانه‌روزی معادل ۴۹۰ لیتر دارند. چهار الگوی اول، طبق مجموعه آزمایش‌های واقعی برای ساختمان‌های نمونه در هر دسته‌ای از کاربردها اندازه‌گیری شده‌اند [۱۲].



شکل (۲): الگوهای مصرف ساعتی آب گرم به کار رفته در شبیه‌سازی [۱۲]

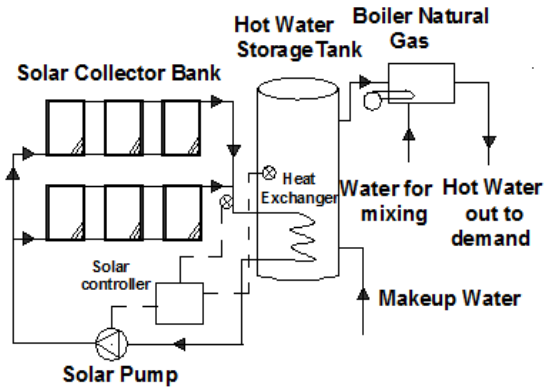
۳. مدل ریاضی سیستم آبگرمکن خورشیدی

در این مقاله با استفاده از برنامه SIMULINK که یکی از جعبه‌ابزارهای نرم‌افزار MATLAB است، آبگرمکن خورشیدی گردش اجباری برای تأمین آب گرم در دمای ۵۵°C شبیه‌سازی شده است. راندمان کلکتور خورشیدی (η_c) توسط رابطه (۱) مدل‌سازی شده است [۱۹]:

$$\eta_c = F_R(\tau\alpha)_n K_\theta - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I_t} \right) \quad (1)$$

که ضریب K_θ ، اصلاح‌گر زاویه برخورد تابش واقع بر صفحه کلکتور

خورشیدی، مخزن ذخیره آب گرم، مبدل حرارتی درون مخزن، بویلر و کنترل‌گرهای پمپ می‌باشند. اطلاعات کلکتورهای انتخابی، توسط مؤسسه رتبه‌بندی تجهیزات خورشیدی در دسترس هستند [۱۸] و مشخصات اجزاء سیستم در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): سیستم آبگرمکن خورشیدی شبیه‌سازی شده.

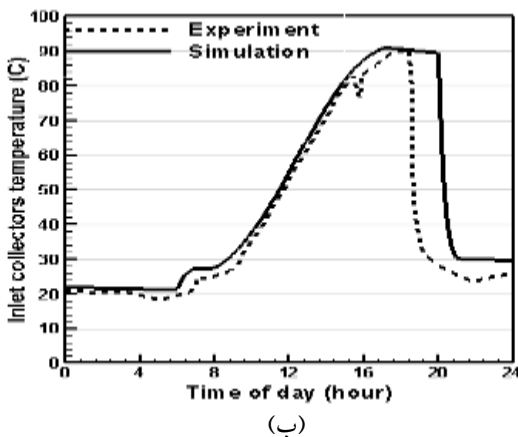
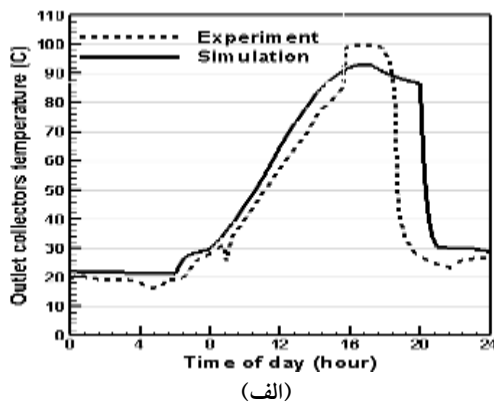
جدول (۱): مشخصات فنی سیستم آبگرمکن خورشیدی شبیه‌سازی شده.

پارامتر	واحد	سیستم با کلکتور تخت	سیستم با کلکتور صفحه
$F_R(\tau\alpha)_n$	-	۰/۴۲۶	۰/۶۸۴
$F_R U_L$	(W.m ⁻² .°C ⁻¹)	۱/۲۵۴	۴/۵۸۷
سطح خالص هر کلکتور	m ²	۲/۳۰۸	۱/۸۹
سطح ناخالص هر کلکتور	m ²	۴/۰۷۸	۲
سطح جاذب هر کلکتور	m ²	۱/۹۹۴	۱/۹
تعداد کلکتورها	-	۷-۱	۱۰-۱
دبی جریان عبوری از کلکتور در حالت تست	(Kg.m ⁻² .s ⁻¹)	۰/۰۲۱	۰/۰۲
زاویه شیب کلکتورها نسبت به افق	درجه	۳۴/۲۳	۳۴/۲۳
ضریب اتلاف حرارتی مخزن ذخیره	(W.m ⁻² .°C ⁻¹)	۰/۸	۰/۸
راندمان حرارتی بویلر	-	۰/۸۵	۰/۸۵
ضریب تأثیر مبدل حرارتی درون مخزن	-	۰/۸۵	۰/۸۵

در جدول (۱)، سطح خالص هر کلکتور^۱، معادل سطحی از پوشش کلکتور است که در معرض هوای آزاد قرار دارد و سطح ناخالص هر کلکتور^۲، معادل کل سطح اشغال شده توسط هر کلکتور است. همچنین، پارامترهای F_R ، $(\tau\alpha)_n$ و U_L به ترتیب، بیانگر ضریب برداشت گرمای کلکتور، حاصل‌ضرب عبور در جذب تابش توسط

- Collector Net Aperture Area
- Collector Gross Area

و ورودی مجموعه کلکتورها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. طبق شکل (۳)، ملاحظه می‌شود که نتایج شبیه‌سازی همخوانی مطلوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. اختلاف زمانی موجود در نمودارها بین ساعات ۱۸ و ۳۰ دقیقه تا ۲۰ را می‌توان به فرض توزیع دمای آمیخته سیال درون مخزن در شبیه‌سازی انجام‌شده نسبت داد که در حالت آزمایشگاهی و واقعیت، دمای سیال درون مخزن کاملاً یکنواخت نیست و دارای لایه‌بندی حرارتی^۱ است. البته عوامل دیگر، از جمله موقعیت قرارگیری حسگرهای دمای کنترل‌گر پمپ در حالت آزمایشگاهی و عدم محاسبه اتلاف‌های حرارتی لوله‌های رابط کلکتورها و مخزن در مدل شبیه‌سازی، بر بروز اختلاف بین نتایج دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بی‌تأثیر نیستند. مطابق نتایج شبیه‌سازی، دمای سیال در ورودی کلکتورها به طور متوسط، ۷ درصد و در خروجی کلکتورها به طور متوسط، ۱۰ درصد با حالت آزمایشگاهی اختلاف دارد.



شکل (۳): مقایسه نتایج شبیه‌سازی (نمودار پررنگ) و نتایج آزمایشگاهی مرجع [۹] (نمودار خط‌چین)، (الف) دمای سیال در خروجی کلکتور و (ب) دمای سیال در ورودی کلکتور.

می‌باشد و پارامترهای T_a ، T_i ، I_t به ترتیب، بیانگر شدت تابش خورشید، دمای سیال در ورودی کلکتورها و دمای محیط هستند. در ضمن، پارامترهای $F_{RU}L$ و $F_{R(\alpha)_n}$ به دلیل اختلاف موجود بین مقدار دبی جریان سیال گذرنده از کلکتور در حالت کاربردی و مقدار دبی جریان سیال در زمان تست کلکتور، اصلاح شده‌اند [۱۹].

با فرض توزیع دمای کاملاً آمیخته سیال درون مخزن و با در نظر گرفتن دمای آب سرد ورودی مخزن برابر با 10°C ، معادلهٔ توازن انرژی برای مخزن ذخیرهٔ آب گرم عبارت است از:

$$m_f C_p (T_o - T_i) - m_i C_p (T_s - T_m) - U_s A_s (T_s - T_a) = \rho C_p V_s \frac{dT_s}{dt} \quad (2)$$

که m_f دبی جرمی جریان سیال گذرنده از کلکتورها، C_p ظرفیت گرمایی ویژهٔ سیال، T_o دمای سیال در خروجی کلکتورها، m_i دبی جرمی آب گرم مصرفی، T_s دمای سیال درون مخزن ذخیره و T_m دمای آب سرد ورودی مخزن می‌باشند. همچنین، U_s ضریب تلفات حرارتی مخزن، A_s سطح جانبی مخزن، ρ چگالی سیال و V_s حجم مخزن می‌باشند.

معادلات (۳) و (۴) به ترتیب، نرخ انرژی خورشیدی مفید منتقل شده به آب درون مخزن (Q_{sol}) و نرخ انرژی کمکی دریافت شده از بویلر (Q_{aux}) را برحسب ژول بر ثانیه محاسبه می‌کنند:

$$Q_{sol} = m_i C_p (T_s - T_m) \quad (3)$$

$$Q_{aux} = \frac{1}{\eta_b} [m_i C_p (T_i - T_s)] \quad (4)$$

که η_b راندمان انرژی بویلر و T_i دمای آب گرم مصرفی می‌باشند. کسر خورشیدی f ، به‌عنوان نسبت انرژی خورشیدی مفید تحویلی به بار مصرفی به مجموع کل انرژی مورد نیاز برای گرمایش آب، مطابق رابطهٔ (۵) تعریف می‌شود:

$$f = \frac{Q_{sol}}{Q_{sol} + Q_{aux}} \quad (5)$$

۴. اعتبارسنجی حل عددی معادلات

به منظور بررسی اعتبار حل عددی معادلات ذکرشده، نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مطالعهٔ آزمایشگاهی انجام‌شده در مرجع [۹] مقایسه شده‌اند. برای این هدف، سیستم آبگرمکن خورشیدی با کلکتور لوله خالص و با مشخصات فنی و شرایط عملکرد مشابه سیستم مطالعه‌شده در مرجع [۹] شبیه‌سازی شده است و دماهای سیال عامل در خروجی

۵. تحلیل اقتصادی سیستم آبگرمکن خورشیدی

دوره بازگشت سرمایه سیستم، به عنوان مدت زمان لازم برای برابر شدن سود حاصل از سیستم آبگرمکن خورشیدی با هزینه خرید اولیه تجهیزات سیستم خورشیدی تعریف می‌شود [۲۰] و در این مطالعه، مقدار آن محاسبه شده است. پارامترهای اقتصادی به کار رفته در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۲): پارامترهای اقتصادی.

پارامتر	واحد	مقدار
نرخ تنزیل	درصد	۱۰ [۲۲]
نرخ تورم	درصد	۹ [۲۲]
عمر سیستم	سال	۲۰
قیمت کلکتور صفحه تخت	\$.m ²	۲۰۰
قیمت کلکتور لوله خلاء	\$.m ²	۱۵۰
قیمت مخزن	\$.m ²	۸۴/۲ [۲۳]
قیمت گاز	\$.m ³	۰/۵

۶. تحلیل نتایج

سیستم آبگرمکن خورشیدی، برای تمامی الگوهای مصرف آب گرم اشاره شده و دو نوع کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء، شبیه‌سازی شده است و خروجی‌های شبیه‌سازی کارایی حرارتی سیستم، از جمله انرژی کمکی و کسر خورشیدی به عنوان ورودی برای تعیین کارایی اقتصادی سیستم، استفاده شده‌اند. در تمامی حالت‌ها، شبیه‌سازی با نسبت نرخ جریان سیال عبوری از کلکتورها به سطح خالص کلکتورها برابر با ۱۵ Kg/h.m² انجام گرفته است و نسبت حجم مخزن به سطح خالص کلکتورها برابر با ۵۰ Lit/m² در نظر گرفته شده است [۲۰].

سطح کلکتور، یکی از پارامترهای مهم در طراحی آبگرمکن‌های خورشیدی می‌باشد و با افزایش آن، کارایی حرارتی سیستم هم افزایش می‌یابد. این پارامتر به شدت، بر کارایی اقتصادی سیستم خورشیدی تأثیرگذار است و انتخاب سطح مناسب کلکتور در سیستم‌های خورشیدی، باید بر مبنای دستیابی به کارایی اقتصادی مطلوب سیستم انجام شود.

شکل (۴)، تغییرات سود سالانه سیستم گرمایش آب خورشیدی را بر حسب سطح ناخالص کلکتورهای لوله خلاء برای الگوهای مختلف، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای همه الگوها، به کارگیری سطح ۱۲/۲ مترمربع کلکتور لوله خلاء، بیشترین سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی (معادل ارزش کنونی پول) و کمترین دوره بازگشت سرمایه را به همراه دارد. در این سطح، بیشترین اختلاف مشاهده شده در سود سالانه سیستم خورشیدی، بین الگوهای ۲ و ۱ با الگوی مصرف ۳ است که معادل ۲۲ درصد می‌باشد و در این سطح، دوره بازگشت سرمایه

به منظور تعیین کارایی اقتصادی سیستم، در این مطالعه، از روش تحلیل چرخه عمر سیستم استفاده شده است [۱۹، ۲۰]. هزینه‌های سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی ($ALCC_{sol}$) و سیستم آبگرمکن سوختی معمولی ($ALCC_{conv}$) به ترتیب، طبق روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند:

$$ALCC_{sol} = [(C_s + A_c C_c).CRF] + [0.03(C_s + A_c C_c).PWF(i; d; n).CRF] + [Q_b C_f.PWF(i; d; n).CRF] \quad (6)$$

$$ALCC_{conv} = Q_l C_f PWF(i; d; n).CRF \quad (7)$$

که C_s هزینه خرید مخزن، A_c سطح کلکتورها، C_c هزینه خرید کلکتورها و C_f هزینه ویژه سوخت است. Q_b و Q_l به ترتیب، انرژی گرمایی سالانه مورد نیاز برای گرمایش آب از طریق سوختن سوخت در آبگرمکن معمولی و انرژی کمکی سالانه مورد نیاز (تأمین شده توسط بویلر) برای گرمایش آب از طریق آبگرمکن خورشیدی، بر حسب ژول هستند. در این مقاله، هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات، معادل ۳ درصد کل هزینه خرید اولیه تجهیزات، فرض شده است [۲۱] و نرخ افزایش سالانه این هزینه معادل ۱ درصد در نظر گرفته شده است. طبق رابطه (۸)، ضریب ارزش کنونی هزینه‌ها $(PWF(i; d; n))$ ، مقدار هزینه سال اول را به مجموع هزینه‌ها در طول n سال با نرخ تورم i و نرخ تنزیل بازار d مطابق با ارزش کنونی پول تبدیل می‌کند. مطابق معادله (۹)، ضریب بازیافت سرمایه (CRF) ، ارزش فعلی هزینه‌ها را با توجه به نرخ تنزیل بازار و در مدت n سال به مقادیر مساوی و یکنواخت توزیع می‌کند.

$$PWF(i; d; n) = \frac{1}{d-1} \left[1 - \left(\frac{1+i}{1+d} \right)^n \right] \quad (8)$$

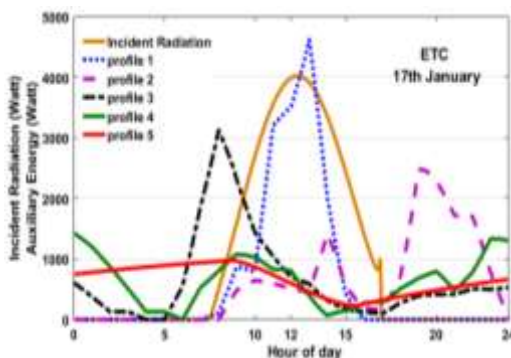
$$CRF = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (9)$$

سود سالانه حاصل از سیستم آبگرمکن خورشیدی ($ALCS$) که برابر با اختلاف بین مقادیر هزینه‌های سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی و هزینه‌های سالانه سیستم آبگرمکن سوختی معمولی می‌باشد، مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$ALCS = ALCC_{conv} - ALCC_{sol} \quad (10)$$

1. Present Worth Factor (PWF)
2. Capital Recovery Factor (CRF)

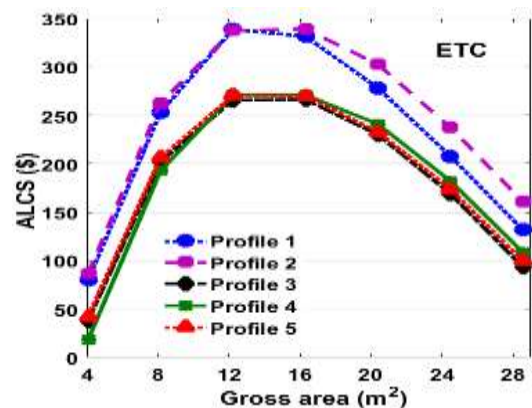
در شکل (۶) تابش برخوردی به کل سطح خالص کلکتورهای لوله خلأ و انرژی کمکی مورد نیاز سیستم، به طور ساعتی در سردترین روز نمونه (۱۷ ژانویه)، نشان داده شده است. مشاهده می شود که، الگوهای ۳، ۴ و ۵ در ساعات عدم دسترسی به انرژی خورشیدی، انرژی کمکی زیادی لازم دارند. زیرا به ترتیب، ۵۱، ۳۷ و ۴۶ درصد مصرف آب گرم در این الگوها، بین ساعات ۲۳ تا ۱۰ صبح می باشد؛ در این زمانها، به دلیل در دسترس نبودن تابش خورشید، فاصله گرفتن از غروب خورشید و نیز، تلفات حرارتی مخزن در طول شب، دمای آب درون مخزن به شدت کاهش یافته و انرژی کمکی مورد نیاز سیستم افزایش می یابد. در الگوهای ۱ و ۲، مصرف آب گرم بین ساعات ۲۳ تا ۱۰ صبح، نسبت به دیگر الگوها خیلی کمتر است و به ترتیب، برابر با ۱۱ و ۵ درصد کل مصرف روزانه آب گرم می باشد؛ به علاوه، اوج مصرف آب گرم در ساعات ظهر و اوایل شب قرار دارد که سیستم خورشیدی در این زمانها فعال تر بوده، بنابراین انرژی کمکی مورد نیاز سیستم برای این الگوها کاهش می یابد.



شکل (۶): تغییرات ساعتی انرژی کمکی مورد نیاز سیستم با سطح ناخالص ۱۲/۲ متر مربع کلکتور لوله خلأ و تغییرات ساعتی تابش برخوردی به سطح خالص کلکتورها (در روز نمونه ۱۷ ژانویه).

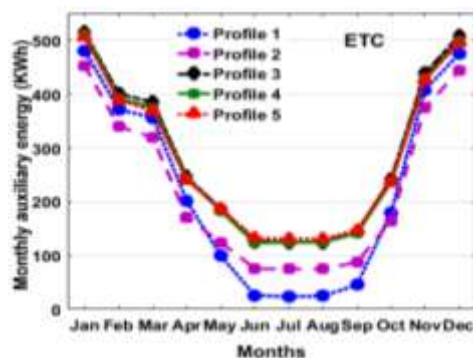
در شکل (۷) تغییرات سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی را برحسب سطح ناخالص کلکتورهای صفحه تخت برای الگوهای مختلف، نشان می دهد. مشاهده می شود که برای همه الگوها، به کارگیری سطح ۸ مترمربع کلکتور صفحه تخت، بیشترین سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی و کمترین دوره بازگشت سرمایه را نتیجه می دهد و برای سیستمی با این سطح کلکتور، بیشترین اختلاف مشاهده شده در سود سالانه سیستم، بین الگوی ۲ با الگوهای ۳ و ۴ است که معادل ۴۰/۳ درصد می باشد و در این حالت، دوره بازگشت سرمایه سیستم برای الگوهای ۳ و ۴، معادل ۱۰/۹ سال و برای الگوی ۲ برابر با ۹/۱ سال می باشد.

سیستم آبگرمکن خورشیدی برای الگوهای ۱ و ۲، معادل ۷/۱ سال و برای الگوی ۳، معادل ۸ سال است.



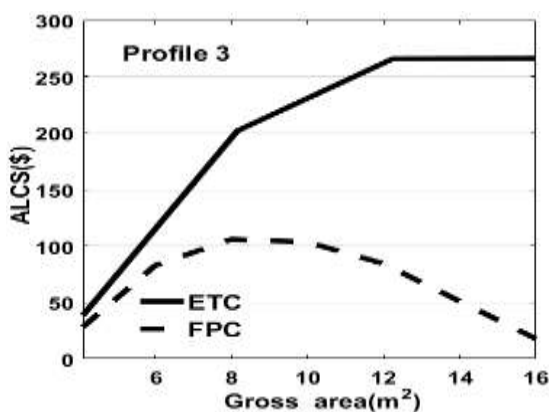
شکل (۴): تغییرات سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی برحسب سطح ناخالص کلکتورهای لوله خلأ برای الگوهای مختلف.

وجود اختلاف در سوددهی سیستم و دوره بازگشت سرمایه برای الگوهای مختلف، نشأت گرفته از اختلاف در کارایی حرارتی و انرژی کمکی مورد نیاز سیستم است. همان طور که در شکل (۵) ملاحظه می شود، برای سیستم با کلکتور لوله خلأ و در سطح مناسب ذکر شده (سطح ناخالص ۱۲/۲ مترمربع)، بیشترین اختلاف در مقادیر انرژی کمکی ماهانه برای الگوهای مختلف، در ماه های گرم سال که تابش خورشید بیشتر است (ژوئن، جولای، اوت و سپتامبر)، مشاهده می شود و این اختلاف بین الگوهای مصرف ۱ و ۵ بوده و به طور متوسط، معادل ۷۸/۴ درصد می باشد. البته مقادیر انرژی کمکی و سود سالانه سیستم، برای الگوهای ۳، ۴ و ۵ اختلاف اندکی با هم دارند و همه این الگوها، انرژی کمکی بالاتر و سود سالانه کمتری نسبت به الگوهای ۱ و ۲ دارند.

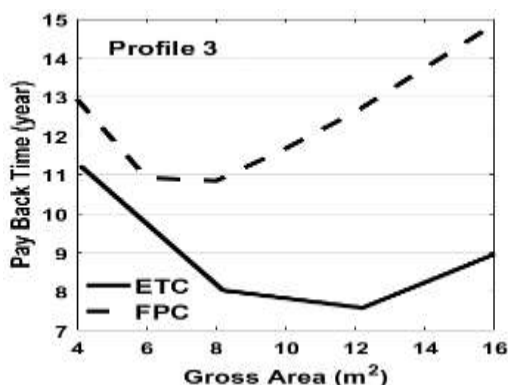


شکل (۵): تغییرات انرژی کمکی ماهانه مورد نیاز سیستم با سطح خالص ۱۲/۲ مترمربع کلکتور لوله خلأ برای الگوهای مختلف.

در شکل (۹)، اختلاف در مقادیر سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی و نیز، دوره بازگشت سرمایه سیستم با به‌کارگیری دو نوع کلکتور صفحه تخت و لوله خلاً و برای حالت استفاده از الگوی ۳ به‌عنوان نمونه، مشاهده می‌شوند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش سطح ناخالص کلکتورها، اختلاف در مقدار سوددهی سالانه سیستم خورشیدی و نیز، اختلاف در دوره بازگشت سرمایه سیستم برای دو نوع کلکتور افزایش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد، در کلکتورهای لوله خلاً، به دلیل کم بودن تلفات حرارتی، کارایی حرارتی نسبت به کلکتورهای صفحه تخت بالاتر بوده، به‌علاوه این کلکتورها، ارزان‌تر هستند؛ از طرفی با جایگزینی کلکتور لوله خلاً برای سطوح ناخالص کلکتورها بین ۴ تا ۱۶ مترمربع، سود سالانه سیستم به‌طور متوسط در الگوی ۱، ۴۳ درصد، در الگوی ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۶۰، ۵۹ و ۵۶ درصد، نسبت به کلکتور صفحه تخت افزایش می‌یابد و دوره بازگشت سرمایه سیستم، به‌طور متوسط برای الگوهای ۱ تا ۵ به ترتیب ۲۹، ۲۸، ۳۰، ۲۸ و ۲۹ درصد، نسبت به حالت استفاده از کلکتور صفحه تخت کاهش می‌یابد.



(الف)

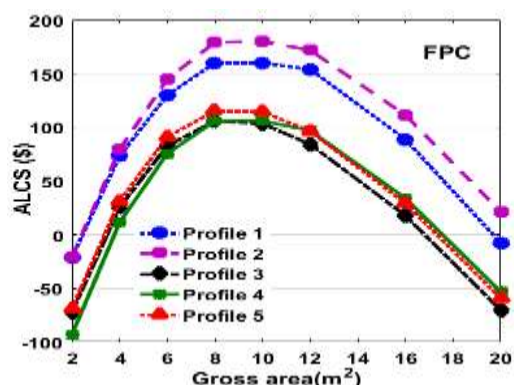


(ب)

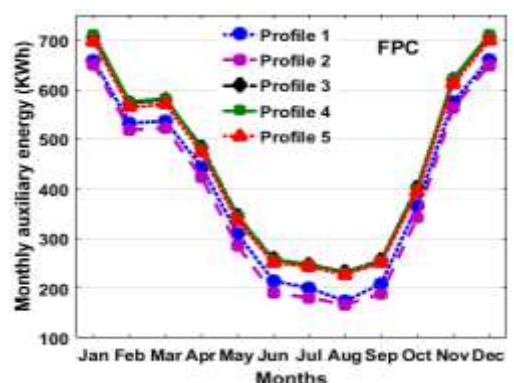
شکل (۹): (الف) تغییرات سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی، (ب) تغییرات دوره بازگشت سرمایه سیستم، برحسب سطح ناخالص کلکتورهای صفحه تخت و لوله خلاً برای الگوی ۳.

همچنین، طبق شکل (۸)، در این سیستم مقادیر انرژی کمکی ماهانه برای الگوهای ۳، ۴ و ۵ خیلی به هم نزدیک می‌باشند؛ با این حال، در سطح کلکتور ذکرشده (۸ مترمربع)، ۸ درصد اختلاف در مقدار سوددهی سیستم با الگوی مصرف ۵ و الگوی ۳ دیده می‌شود که این موضوع به دلیل قرارگیری اوج مصرف الگوی ۳ در ساعت ۸ صبح است و نیز، درصد مصرف آب گرم بین ساعات ۶ تا ۱۰ صبح در این الگو، بیشتر از دیگر الگوها است؛ در نتیجه در این ساعات به دلیل فاصله گرفتن از غروب خورشید، دمای آب داخل مخزن افت شدیدی پیدا کرده و کارایی حرارتی و اقتصادی سیستم نسبت به دیگر الگوها کاهش می‌یابد.

نتایج ارائه شده در شکل (۸) حکایت از این دارد که با به‌کارگیری الگوهای مختلف، بیشترین اختلاف موجود در مقادیر انرژی کمکی ماهانه مورد نیاز سیستم با کلکتور صفحه تخت، در ماه‌های گرم سال (ژوئن تا سپتامبر)، مشاهده می‌شود و بین الگوهای ۳، ۴ و ۵ با الگوی ۲ است که به‌طور متوسط معادل ۲۷ درصد می‌باشد.



شکل (۷): تغییرات سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی برحسب سطح ناخالص کلکتورهای صفحه تخت برای الگوهای مختلف



شکل (۸): تغییرات انرژی کمکی ماهانه مورد نیاز سیستم با سطح ناخالص ۸ مترمربع کلکتور صفحه تخت برای الگوهای مختلف.

تا ۲۰ متمرکز شود که با جذب تابش خورشیدی، آبگرمکن به اندازه کافی فعال شده و انرژی کمکی کمتری نیاز دارد.

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، مدلی برای شبیه‌سازی دینامیکی سیستم آبگرمکن خورشیدی با دو نوع کلکتور صفحه تخت و لوله خلاء برای الگوهای مختلف مصرف آب گرم ارائه شده است. در هر سیستم، به‌منظور دستیابی به بیشترین سوددهی سالانه و کمترین دوره بازگشت سرمایه سیستم، سطح مناسب کلکتورها تعیین شده است. طبق نتایج، با تغییر الگوی مصرف آب گرم، سطح مناسب کلکتورها در هر سیستم تغییر نمی‌کند، ولی سوددهی سالانه و دوره بازگشت سرمایه سیستم تغییرات قابل توجهی دارند. به‌کارگیری الگوهایی که اوج مصرف آب گرم آن‌ها در ظهر و در ساعات اوایل شب می‌باشد، بیشترین سود سالانه و کمترین دوره بازگشت سرمایه سیستم آبگرمکن خورشیدی را به همراه دارد و در مقابل، برای الگوهایی که درصد بالایی از مصرف آب گرم را به ساعات ۲۳ تا ۱۰ صبح اختصاص می‌دهند و مخصوصاً اوج مصرف آن‌ها در صبح زود می‌باشد، سود سالانه کمترین مقدار و دوره بازگشت سرمایه بیشترین مقدار را دارد.

تغییر الگوی مصرف آب گرم می‌تواند به‌طور متوسط، دوره بازگشت سرمایه سیستم آبگرمکن خورشیدی با کلکتور صفحه تخت را ۱۸ درصد کاهش، سود سالانه سیستم را ۶۱ درصد افزایش و کسر خورشیدی سالانه سیستم را ۸ درصد افزایش دهد. در سیستم با کلکتورهای لوله خلاء، تغییر الگوی مصرف می‌تواند منجر به کاهش ۱۵ درصدی دوره بازگشت سرمایه و افزایش ۳۱ درصدی سود سالانه سیستم شود و همچنین، کسر خورشیدی سالانه سیستم را ۶/۵ درصد افزایش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش سود سالانه حاصل از آبگرمکن خورشیدی به میزان بیش از ۴۰ درصد و نیز کاهش دوره بازگشت سرمایه سیستم، با جایگزینی کلکتور لوله خلاء به جای کلکتور صفحه تخت امکان‌پذیر است. در الگوی ۳ که اوج مصرف آب گرم در ساعت ۸ صبح قرار دارد و درصد مصرف آب گرم بین ساعات ۲۳ تا ۱۰ صبح بیشترین مقدار را دارد، جایگزینی کلکتور لوله خلاء، کارایی اقتصادی سیستم را در مقایسه با الگوهای دیگر به میزان بیشتری افزایش می‌دهد و این افزایش کارایی اقتصادی به‌طور متوسط، معادل افزایش ۶۰ درصدی سوددهی سالانه سیستم و کاهش ۳۰ درصدی دوره بازگشت سرمایه می‌باشد.

در شرایطی که تعیین زمان مصرف آب گرم در اختیار مصرف‌کننده باشد، مثلاً در کاربردهای روشن کردن ماشین‌های لباس‌شویی، ظرف‌شویی و تمیزکاری اماکن، بهتر است این مصرف بین ساعات ۱۳

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
$ALCC$	هزینه سالانه سیستم (\$)
$ALCS$	سود سالانه سیستم آبگرمکن خورشیدی (\$)
C	هزینه (\$)
C_f	هزینه ویژه سوخت ($\$.J^{-1}$)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه سیال ($J.Kg^{-1}C^{-1}$)
d	نرخ تنزیل بازار
ETC	کلکتور لوله خلاء
f	کسر خورشیدی سیستم آبگرمکن خورشیدی
FPC	کلکتور صفحه تخت
F_R	ضریب برداشت گرمای کلکتور
I	شدت تابش خورشیدی ($W.m^{-2}$)
i	نرخ تورم
K_{θ}	اصلاح‌گر زاویه برخورد تابش واقع بر صفحه کلکتور
m	دبی جرمی سیال ($Kg.s^{-1}$)
n	عمر سیستم (سال)
T	دما ($^{\circ}C$)
t	زمان (s)
U	ضریب اتلاف حرارتی ($W.m^{-2}C^{-1}$)
V	حجم (m^3)
علائم یونانی	
η	بازده حرارتی
$(\tau\alpha)_n$	حاصل ضرب عبور در جذب تابش توسط کلکتور
ρ	چگالی سیال ($Kg.m^{-3}$)
زیرنویس‌ها	
a	محیط
aux	کمکی

m	آب سرد ورودی مخزن	b	بویلر
o	خروجی کلکتور	c	کلکتور
s	مخزن ذخیره‌ی آب گرم	$conv$	سیستم آبگرمکن سوختی معمولی
sol	سیستم آبگرمکن خورشیدی	f	سوخت
t	سطح شیب‌دار	i	ورودی کلکتور
		l	بار مصرفی آب گرم

مراجع

- [1] Greening, B., Azapagic, A., "Domestic Solar Thermal Water Heating: A Sustainable Option for the UK?," Renewable Energy, Vol. 63, pp. 23-36, 2014.
- [2] خراسانی‌زاده، حسین؛ مسچی، سید مرتضی، «تعیین زاویه شیب بهینه ماهیانه، فصلی، شش ماهه و سالانه کلکتورهای خورشیدی تخت در کاشان»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۳۸-۴۹، ۱۳۹۲.
- [3] Kalogirou, S., "Solar Thermal Collectors and Applications," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, No. 3, pp. 231-295, 2004.
- [4] Papadimitratos, A., Sobhansarbandi, S., Pozdin, V., Zakhidov, A., "Evacuated Tube Solar Collectors Integrated with Phase Change Materials," Solar Energy, Vol. 129, pp. 10-19, 2016.
- [5] Naspolini, H., Rütger, R., "Assessing the Technical and Economic Viability of Low Cost Domestic Solar Hot Water Systems (DSHWS) in Low-Income Residential Dwellings in Brazil," Renewable Energy, Vol. 48, pp. 92-99, 2012.
- [6] Cao, F., Zhao, L., Zhang, F., Guo, L., "Redesign of a Water Heating System Using Evacuated Tube Solar Collectors: TRNSYS Simulation and Techno-Economic Evaluation," Heat Transfer Engineering, Vol. 35, No. 6-8, pp. 556-566, 2014.
- [7] Hazami, M., Naili, N., Attar, I., Farhat, A., "Solar Water Heating Systems Feasibility for Domestic Requests in Tunisia: Thermal Potential and Economic Analysis," Energy Conversion and Management, Vol. 76, pp. 599-608, 2013.
- [8] Lima, T., Dutra, J., Primo, A., "Solar Water Heating for a Hospital Laundry: A Case Study," Solar Energy, Vol. 122, pp. 737-748, 2015.
- Abdunnabi, MJR., Alakder, KMA., Alkishriwi, NA., Abughres, SM., "Experimental Validation of Forced Circulation of Solar Water Heating Systems in TRNSYS," Energy Procedia, Vol. 57, pp. 2477-2486, 2014.
- [9] Ayompe, LM., Duffy, A., McCormack, SJ., Conlon, M., "Validated TRNSYS Model for Forced Circulation Solar Water Heating Systems with Flat Plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors," Applied Thermal Engineering, Vol. 31, No. 8, pp. 1536-1542, 2011.
- [10] Ahmed, K., Pylsy, P., Kurnitski, J., "Monthly Domestic Hot Water Profiles for Energy Calculation in Finnish Apartment Buildings," Energy and Buildings, Vol. 97, pp. 77-85, 2015.
- [11] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers., HVAC Applications Handbook, SI Edition, Atlanta GA, 2011.
- [13] Everts, J., Swan, L., "Domestic Hot Water Consumption Estimates for Solar Thermal System Sizing," Energy and Buildings, Vol. 58, pp. 58-65, 2013.
- [14] Dongellini, M., Falcioni, S., Morini, G., "Dynamic Simulation of Solar Thermal Collectors for Domestic Hot Water Production," Energy Procedia, Vol. 82, pp. 630-636, 2015.
- [15] Bouhal, T., Agrouaz, Y., Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., El Rhafiki, T., et al., "Impact of Load Profile and Collector Technology on the Fractional Savings of Solar Domestic Water Heaters under Various Climatic Conditions," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 18, pp. 13245-13258, 2017.
- [16] Shirinbakhsh, M., Mirkhani, N., Sajadi, B., "A Comprehensive Study on the Effect of Hot Water Demand and PCM Integration on the Performance of SDHW System," Solar Energy, Vol. 159, pp. 405-414, 2018.
- [17] Pillai, I., Banerjee, R., "Impact of Hot Water Usage Pattern and Location on Economics of Solar Water Heating Systems," Water and Energy Abstracts, Vol. 14, No. 4, 2004.
- [18] Solar Rating and Certification Corporation., SRCC Certification, Rating and Listing Directory, August 2012, http://www.solar_rating.org/certification_listing_directory/index.html.
- [19] Duffie, J.A., Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, New York, John Wiley & Sons, 2013.
- [20] Kalogirou, S., Solar Energy Engineering: Processes and Systems, Academic Press, 2013.
- [21] Russo, B., Chvala, W., American Recovery and Reinvestment Act (ARRA) Federal Energy Management Program Technical Assistance Project 281 Solar Hot Water Application Assessment for US Army IMCOM-Southeast Region. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US), 2010.
- [22] Central Bank of Iran., Term Investment Deposit Rates, March 2017, <http://www.cbi.ir/simplelist/1493.aspx>.
- [23] Kulkarni, G., Kedare, S., Bandyopadhyay, S., "Determination of Design Space and Optimization of Solar Water Heating Systems," Solar Energy, Vol. 81, No. 8, pp. 958-968, 2007.