

ارتقای کارایی آبگرمکن ترموسیفونی خورشیدی - برقی با استفاده از کلید زمانکار روزانه

محمدعلی صادقزاده

دانشیار دانشکده فیزیک، پژوهشگر مرکز پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه یزد، یزد، ایران
msadeghzadeh@yazd.ac.ir

چکیده: انرژی تابش خورشید یکی از منابع پاک و تجدیدپذیر است که استفاده از آن نیاز حال و آینده بشر می‌باشد. کشور ایران با متوسط سالانه ۳۰۰ روز آفتابی از این پتانسیل بالقوه برخوردار است و آبگرمکن‌های ترموسیفونی خورشیدی ساده‌ترین مبدل‌های خورشیدی - گرمایی به شمار می‌روند. به‌رغم مزایای ویژه، آن‌ها نمی‌توانند در ایام سرد سال، آب‌گرم مصرفی مورد نیاز خانوار را تأمین کنند و لذا نیازمند سیستم پشتیبانی چون گرمکن الکتریکی مقاومتی (المنت برقی) هستند. کاهش انرژی مصرفی به وسیله المنت (سیستم پشتیبان) نه تنها باعث کاهش بار شبکه توزیع برق شده بلکه باعث افزایش کارایی آبگرمکن خورشیدی و ترویج آن‌ها در کاربردهای بخش ساختمان می‌شود. زمان‌بندی روزانه مناسب وصل بودن مدار المنت برقی به کمک کلید تایمر (مد کاری زمانکار) موجب کاهش سهم پشتیبان در مقایسه با وضعیت اتصال پیوسته مدار مذکور (مد کاری دائمی) می‌شود. نتایج میدانی مؤید این است که استفاده از کلید زمانکار در دوره سرما قابل ملاحظه بوده و باعث شده مصرف برق سالانه آبگرمکن ۷۰۰ کیلووات ساعت کاهش و کارایی آن از ۴۴٪ به ۶۷٪ ارتقا یابد.

واژه‌های کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، آبگرمکن خورشیدی، گرمکن الکتریکی، کارایی آبگرمکن، کلید زمانکار.

۱. مقدمه

تعداد ساکنان و الگوی زمانی مصرف آب گرم واحد مسکونی بستگی دارد [۶]. از طرفی استفاده از المنت برقی موجب محدودیت‌های تکنیکی از جمله بالا رفتن جریان و توان مصرفی (و احتمال قطع برق) واحد مسکونی و به تبع، افزایش توان شبکه توزیع برق و در نهایت افزایش تصاعدی هزینه انرژی الکتریکی مصرفی خانوار و نارضایتی و عدم استقبال از این نوع آبگرمکن می‌شود [۱]. تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه شبیه‌سازی عملکرد آبگرمکن خورشیدی برای ارتقای کارایی آن صورت گرفته [۷ و ۸]، ولی مطالعات میدانی و تجربی اندکی درباره عملکرد آبگرمکن‌های خورشیدی گزارش شده است [۹، ۱۰ و ۱۱]. از جنبه ممیزی انرژی، کاهش نسبت انرژی مصرفی به وسیله المنت (سیستم پشتیبان) به انرژی آبگرم مصرفی، سنجه مناسبی برای ارزیابی میزان کارایی آبگرمکن خورشیدی است. قطع بودن مدار المنت برقی در بازه‌های زمانی غیر لزوم و یا زمان‌بندی مناسب وصل بودن مدار مذکور می‌تواند موجب کاهش سهم پشتیبان و افزایش سهم خورشید شود. آیومپه و همکاران در ارزیابی عملکرد آبگرمکن‌های خورشیدی واداشته از کنترل‌کننده‌های هوشمند استفاده کردند [۱۱ و ۱۲]. در این پژوهش به ارائه راهکار و مطالعه میدانی استفاده از کلید زمانکار در مدار المنت برقی برای کاهش سهم سیستم پشتیبان و ارتقای عملکرد آبگرمکن ترموسیفونی خورشیدی- برقی، به منظور ترویج آن‌ها در بخش خانگی پرداخته می‌شود.



شکل (۱): تصویر آبگرمکن ترموسیفونی خورشیدی - برقی تحت مطالعه

انرژی تابش خورشید یکی از منابع پاک و تجدیدپذیر بوده که استفاده از آن نیاز حال و آینده بشر است. کشور پهناور ایران دارای متوسط سالانه ۳۰۰ روز آفتابی و ۲۸۵۰ ساعت آفتاب از این پتانسیل بالقوه برخوردار است [۱]. روش‌های گوناگونی برای استفاده از این منبع انرژی بی‌پایان وجود دارد و گرم کردن آب با استفاده از آبگرمکن خورشیدی، آسان‌ترین و اقتصادی‌ترین روش است. در آبگرمکن خورشیدی ترموسیفونی، منبع ذخیره آب گرم در پشت‌بام و در مجاورت کلکتور و در ارتفاعی حدود نیم متر بالاتر از آن قرار دارد و انرژی تابشی خورشید در کلکتور به صورت گرما جذب شده و توسط سیال حامل (محلول ضد یخ) در اثر پدیده ترموسیفون به منبع آب گرم منتقل و در آن ذخیره شده در طول شبانه‌روز به مصرف خانوار می‌رسد. در این سیستم نیازی به پمپ و کنترل‌کننده‌های دمایی نیست، لذا نه تنها ارزان بلکه عملکرد آن ساده است. به رغم ویژگی‌های منحصر به فرد مذکور، کاربرد آبگرمکن‌های خورشیدی در دنیا به خصوص در ایران توسعه نیافته است [۲ و ۳]. سوای دلایل اقتصادی و مشکلات فنی [۴]، مهم‌ترین دلیل، این واقعیت است که میزان تابش خورشید در تابستان به مراتب بیش از زمستان است در حالی که مصرف آب گرم خانوار در زمستان چندین برابر تابستان است، از این رو آبگرمکن‌های خورشیدی به تنهایی نمی‌توانند آب گرم مصرفی خانوار را تأمین کنند و معمولاً به عنوان پیش‌گرمکن آبگرمکن اصلی به کار می‌روند. از طرفی چون هیچ تضمینی نیست که آب گرم موجود در مخزن در گستره مطلوب حداقل ۴۰-۴۵ درجه سانتی‌گراد گرم شده باشد و مقدار آن کفاف مصارف خانگی (تا روز بعد و یا روز آفتابی دیگر) را بدهد، همواره به یک سیستم گرمکن پشتیبان^۱ مکمل نیاز است. ساده‌ترین، ارزان‌ترین، کوچک‌ترین و مؤثرترین (بالاترین راندمان) سیستم پشتیبان آبگرمکن خورشیدی استفاده از گرمکن الکتریکی مقاوم^۲ (المنت برقی) است [۵]؛ لذا چنین آبگرمکنی به «آبگرمکن ترموسیفونی خورشیدی- برقی» معروف است و در شکل (۱)، تصویر نمونه کلکتور صفحه تخت ترموسیفونی غیر مستقیم مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. گرمکن الکتریکی می‌تواند داخل مخزن آبگرمکن، یا بیرون آن و در مسیر لوله جریان آب گرم خروجی از مخزن آبگرمکن باشد. قرار داشتن گرمکن الکتریکی داخل مخزن این مزیت را دارد که به توان الکتریکی کمتری نیاز است و به تبع، تأثیر آن بر بار شبکه توزیع برق کمتر است. به طور کلی، توان الکتریکی المنت، محل (ارتفاع) نصب آن در مخزن آبگرمکن به عوامل زیادی از جمله حجم مخزن،

1. Backup Heater System
2. Auxiliary Electrical Heater

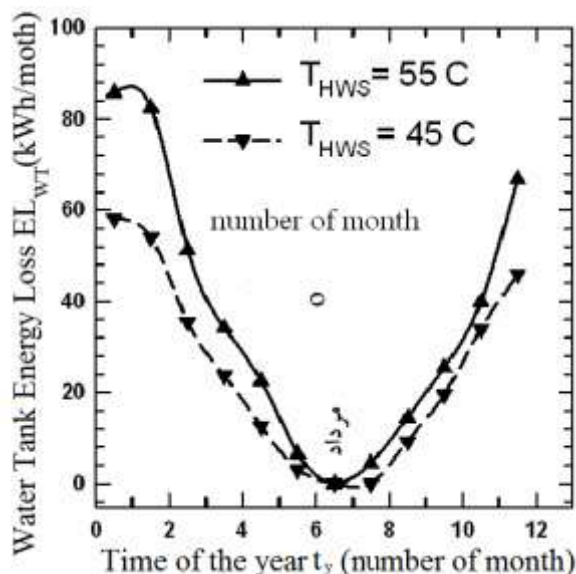
۲. عوامل مؤثر بر عملکرد آبگرمکن خورشیدی

از جنبه فنی و ساختاری، عملکرد آبگرمکن خورشیدی به حجم مخزن، مساحت کلکتور، زاویه نصب کلکتور و دمای تنظیم آب گرم بستگی دارد [۷ و ۸]. خلاصه اینکه هرچه دمای آب گرم، کمتر و حجم مخزن و یا سطح کلکتور بیشتر باشد، عملکرد آبگرمکن خورشیدی (سهم خورشید) مطلوب تر است. از طرفی افزایش گنجایش مخزن و یا مساحت کلکتور باعث بالا رفتن قیمت اولیه سیستم آبگرمکن خورشیدی می شود. لذا حجم بهینه مخزن آب گرم متناسب با نفرات ساکن در واحد مسکونی (۲۲۰ لیتر برای خانوار چهارنفره) و به تبع مساحت کلکتور ۳/۲ مترمربع متناسب با آن (شامل دو پانل ۰/۸ m × ۲m) متداول می باشد و در این پژوهش از چنین آبگرمکنی (ترموسیفونی غیر مستقیم با کلکتور صاف تخت) استفاده شده است. از طرفی، عملکرد آبگرمکن خورشیدی نه تنها به اوضاع اقلیمی مانند میزان تابش خورشید (و به تبع میزان صافی جو)، وزش باد، طول روز، ماه سال و عرض جغرافیایی بستگی دارد بلکه به الگوی مصرف آب گرم در شبانه روز نیز وابسته است [۷، ۸، ۱۱]. در این بخش به دو مورد ارزیابی اتلاف گرما از مخزن آبگرمکن و الگوی مصرف آب گرم در طول شبانه روز که به راهکار ارتقای کارایی آبگرمکن خورشیدی مربوط اند می پردازیم.

۱.۲. ارزیابی اتلاف گرمای مخزن آبگرمکن

در سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفونی، مخزن آب گرم باید در ارتفاعی بالاتر از کلکتور قرار داشته باشد تا اینکه در روز عمل ترموسیفون رخ دهد و در شب از جریان معکوس جلوگیری کند. هرچند که مخزن آب گرم عایق بندی است، انتقال گرما از منبع به محیط سرد بیرون به خصوص در شب های طولانی و سرد اجتناب ناپذیر است. این پدیده باعث می شود که بخشی از گرمای جذب شده در روز تلف شود و اتلاف گرما از مخزن، یکی از مشکلات تکنیکی مهم آبگرمکن خورشیدی به شمار می رود [۱۳، ۱۴ و ۱۵]. به یقین میزان اتلاف گرما از مخزن آبگرمکن به اختلاف دمای آب گرم T_{HWS} (دمای تنظیم ترموستات) و دمای محیط بستگی دارد و این کمیت در ماه های سرد بیشتر از ماه های گرم است. در مطالعه میدانی انجام شده، ظرفیت آبگرمکن ۲۲۰ لیتر بوده و انرژی الکتریکی مصرف شده به وسیله گرمکن (انرژی گرمایی اتلافی از مخزن) برای تثبیت دمای آب گرم منبع در دمای $T_{HWS} = 55^{\circ}C$ و $T_{HWS} = 45^{\circ}C$ (در شرایطی که انتقال انرژی بین کلکتور و منبع آب گرم وجود نداشت) در

طول ماه های سال اندازه گیری شد و نتایج متوسط ماهانه انرژی اتلافی از مخزن آبگرمکن EL_{WT} برای دو دمای مذکور، به ترتیب با نمادهای مثلث بالا و مثلث پایین در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۶]. از نتایج درمی یابیم که در دی ماه، وقتی دمای تنظیم ترموستات $55^{\circ}C$ باشد، ماهانه بیش از ۸۵ kWh گرما از منبع تلف می شود و در شرایطی که درجه ترموستات $45^{\circ}C$ باشد، میزان اتلاف ماهانه به کمتر از ۶۰ kWh می رسد در حالی که این مقادیر در تابستان ناچیزند.



شکل (۲): منحنی تغییرات متوسط ماهانه انرژی اتلافی از مخزن آبگرمکن خورشیدی EL_{WT} در دو حالت تنظیم دمای آب گرم $45^{\circ}C$ (نمادهای مثلث پایین) و $55^{\circ}C$ (نمادهای مثلث بالا) در طول سال (میلادی)

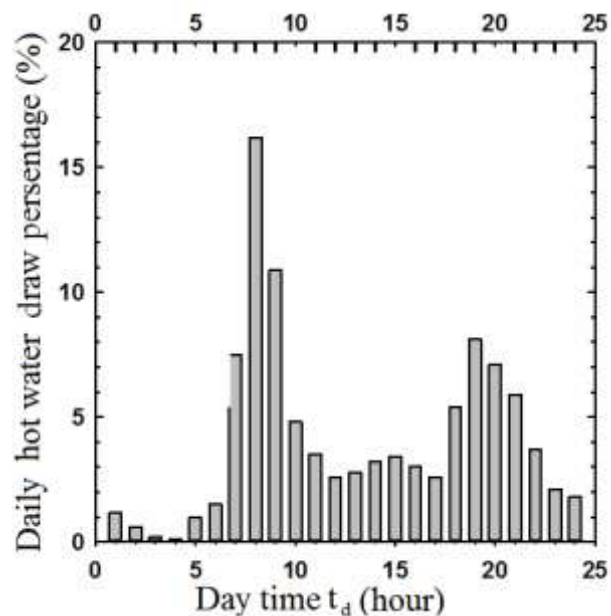
۲.۲. الگوی مصرف آب گرم در شبانه روز

برای درک بهتر عملکرد آبگرمکن خورشیدی لازم است که الگوی زمانی مصرف آب گرم (مقدار آب گرم مصرف شده در ساعت بر حسب زمان) در طول شبانه روز مشخص شود [۱۷ و ۱۸]. بنابراین حجم آب گرم مصرف شده در یک ساختمان مسکونی سه واحدی (دو خانوار سه نفره و یک خانوار چهارنفره) در بازه های زمانی یک ساعته در طول سه شبانه روز (شامل یک روز آخر هفته) اندازه گیری و متوسط گیری شد. مناسب ترین شیوه ارزیابی الگوی زمانی مصرف آب گرم، بهنجارش به ۱۰۰ می باشد و نتایج در نمودار شکل (۳) نشان داده شده است [۱۶]. از شکل مشخص است بیشترین میزان مصرف آب گرم در شبانه روز بین ساعت ۷ و ۸ بامداد است (برای مثال حدود ۱۶٪ کل آب گرم مصرفی شبانه روز بین ساعت ۷ تا ۸ بامداد مصرف می شود) و حدود یک سوم آب گرم بین ساعت ۷ تا ۱۰ بامداد مصرف می شود (بیک اصلی اول). دومین بیک اصلی مصرف، در شامگاه (بیک اصلی

روز بعد به مصرف می‌رسد و قبل از اینکه تابش مؤثر خورشید آغاز گردد (ساعت ۹ بامداد)، ترموستات مدار گرمکن الکتریکی (المنت) را فعال کرده و آب بالای مخزن گرم می‌شود و لذا سهم خورشید در عملکرد آبگرمکن کمتر از حد مورد انتظار است و برعکس سهم المنت برقی (انرژی الکتریکی مصرفی) بیشتر می‌گردد. از طرفی اتلاف گرما از مخزن آبگرمکن [۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۹] در ایام و به‌خصوص شب‌های طولانی سرد زمستان که به‌وسیله المنت برقی جبران می‌شود هم مزید بر علت است و منجر به افزایش مصرف برق آبگرمکن خورشیدی برقی و افزایش تصاعدی هزینه برق خانوار و عدم نارضایتی کاربران می‌شود. برای رفع این مشکل، راهکار کلید زمانکار پیشنهاد و اجرا شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. از آنجا که هیچ لزومی ندارد که دمای مخزن آب گرم در فاصله زمانی اواخر شب تا سحرگاه و یا در نیمروز که آب گرم مصرف چندانی ندارد، در حداکثر مقدار خود ($45^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$) تنظیم باشد، وصل بودن پیوسته مدار گرمکن الکتریکی غیر ضروری بوده و منجر به افزایش بی‌دلیل برق مصرفی می‌شود، بنابراین باید به‌نحوی مدار مذکور را در بازه‌های زمانی مناسب کنترل کرد. بدین منظور، طبق شکل (۴)، مدار گرمکن به‌وسیله کلید زمانکار روزانه DSTK^۱ و کلید زمانکار تنظیم موقت TATK^۲ کنترل می‌شود. از ویژگی‌های کلید DSTK این است که می‌توان زمان وصل مدار المنت در طول شبانه‌روز را با حداقل بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای تنظیم کرد. این کلید مجهز به باتری خازنی (تغذیه‌شونده با برق شهر) می‌باشد که قادر است تا ۵۰ ساعت به کار خود ادامه دهد (با قطع موقت شبکه خلی در کار آن به وجود نمی‌آید) و مدار گرمکن را طبق زمانبندی انجام شده و در ایام بعدی وصل کند. ویژگی کلید زمانکار تنظیم موقت TATK اینست که مدار گرمکن را حداکثر به مدت ۲ ساعت (قابل تنظیم) فعال می‌کند (حتی اگر کلید DSTK قطع باشد). این کار به‌طور دستی انجام می‌شود و فقط برای یک بار عمل می‌کند. کاربرد کلید TATK در شرایطی است که مصارف غیرمتعارف آب گرم رخ دهد، ساکنان می‌توانند با استفاده از این کلید، آب گرم لازم در بازه چندساعته را تأمین کنند. این شرایط کاری مدار گرمکن را به‌اصطلاح، «مد زمانکار» یا TM^۳ می‌گویند.

1. Daily Scheduled Timer Key
2. Temporary Adjustable Timer Key
3. Timing Mode

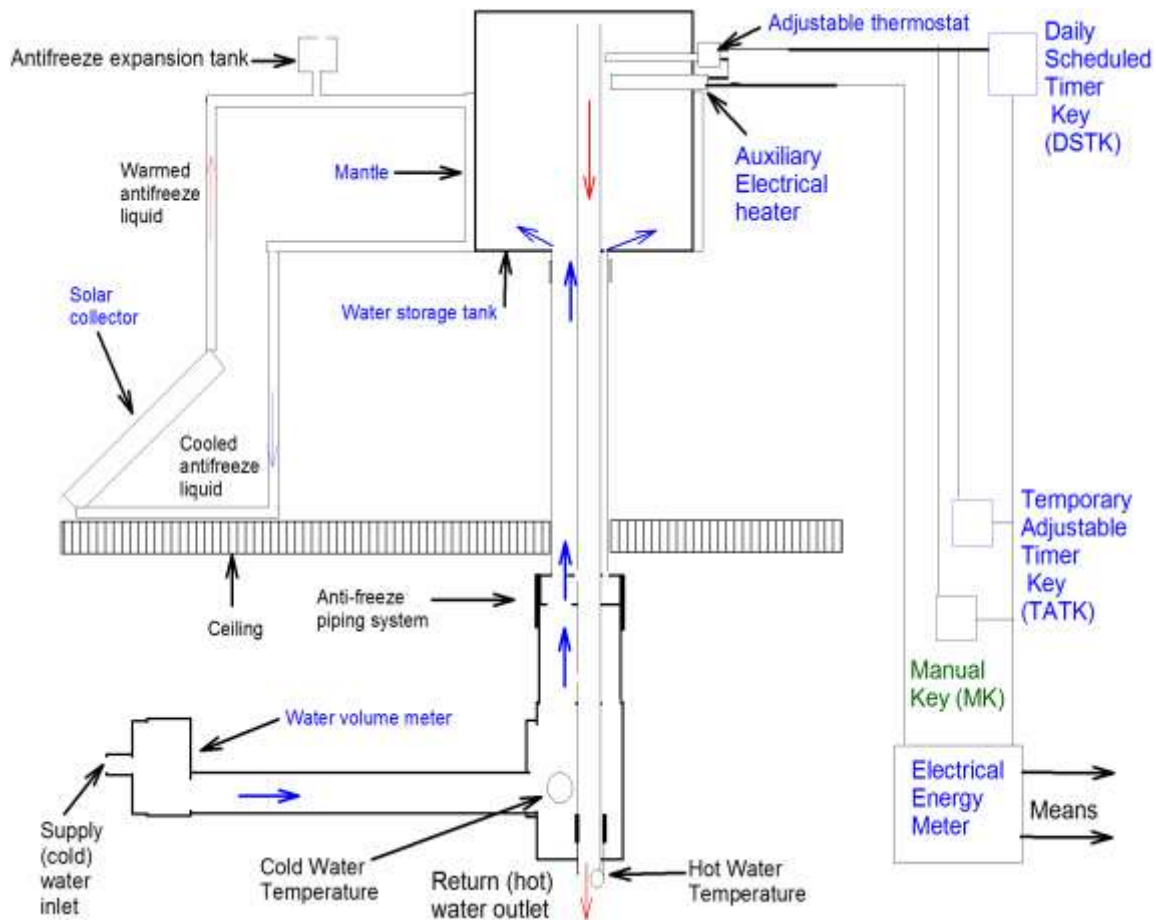
دوم) و پیک فرعی مصرف در حوالی نیمروز رخ می‌دهد. تفاوت این الگوی مصرف با موارد گزارش شده در مراجع [۱۷ و ۱۸]، به تفاوت الگوی زندگی و برنامه کاری (کار دوشیفتی صبح و عصر) بخشی از جامعه ایرانی و غربی مربوط است. از طرفی، تابش خورشید از طلوع آفتاب به تدریج تا نیمروز افزایش می‌یابد لذا نه‌تنها الگوی زمانی مصرف آب گرم، هماهنگ با تابش خورشید نیست بلکه برعکس، در نیمروز شرایط بیشترین تابش خورشید و کمترین مصرف آب گرم وجود دارد. خلاصه اینکه انرژی خورشیدی جذب‌شده به‌وسیله کلکتور در نیمروز و عصر در منبع آب آبگرمکن ذخیره می‌شود و در شامگاه و احتمالاً در بامداد روز بعد به مصرف می‌رسد. از طرفی در تابستان، روزها طولانی‌تر و تابش خورشید به‌مراتب مطلوب‌تر از زمستان است درحالی‌که نیاز به آب گرم در زمستان بیش از تابستان می‌باشد (در ادامه). این عوامل باعث می‌شود که کارایی آبگرمکن خورشیدی در زمستان به‌مراتب کمتر از تابستان باشد. از این رو جبران کاهش توان انرژی خورشید به‌وسیله المنت برقی باعث افزایش سهم انرژی الکتریکی (کاهش سهم خورشید) و مشکلات فنی و اقتصادی مرتبط می‌شود.



شکل (۳): نمودار متوسط میزان (درصد روزانه) آب گرم مصرفی ساعتی برحسب زمان (الگوی زمانی مصرف آب گرم) در ساعات متوالی شبانه‌روز، اندازه‌گیری شده در یک ساختمان مسکونی سه‌واحدی

۳. راهکار کلید زمانکار برای کاهش برق مصرفی

در شرایط مناسب و عادی (که هوا ابری نبوده و مصرف آب گرم بیش از حد متعارف نباشد)، آب گرم ذخیره‌شده در مخزن، حداکثر تا بامداد



شکل (۴): طرح‌واره کلی آبگرمکن خورشیدی ترموسیفونی با سیستم پشتیبان گرمکن الکتریکی مجهز به دو کلید زمانکار (TATK, DSTK) و کلید دستی دائمی (MK)

خورشیدی) در دسترس نباشد. از شکل (۳) دریافت می‌شود که الگوی زمانی مصرف آب گرم دارای دو پیک اصلی بامداد و شامگاه است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، میزان مصرف آب گرم در فاصله زمانی دو پیک اصلی کم است و لزومی ندارد که دمای آب گرم در حداکثر مقدار خود ($45^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C}$) تنظیم باشد (در صورت نیاز ساکنان می‌توانند از کلید زمانکار موقت TATK استفاده کنند) لذا وصل بودن (یکسره) مدار گرمکن الکتریکی در فاصله زمانی دو پیک مذکور (در شب و در روز) چندان اهمیت ندارد. به عبارتی وصل بودن کلید مذکور در روز باعث می‌شود المنت قبل از خورشید آب را گرم کند، و وصل بودن آن در نیمه‌شب تا سحر، موجب اتلاف بی‌مورد گرما از مخزن و در نهایت، باعث افزایش سهم پشتیبان شود. در شکل (۵) نمودار زمانی وضعیت (قطع - وصل) کلید زمانکار DSTK در کاربرد خانگی آبگرمکن خورشیدی نشان داده شده است. این کلید در بازه زمانی ۵ تا ۷/۵ بامداد به مدت ۲/۵ ساعت روشن شده تا آب گرم مورد نیاز پیک مصرف اصلی بامدادی را تأمین کند و سپس در هر ساعت به مدت ۱۵ دقیقه و نیز قبل

در این مدار، کلید دستی یا MK هم تعبیه شده که می‌تواند مدار گرمکن الکتریکی را به صورت پیوسته فعال کند؛ لذا چنین حالتی را «مد دائمی» یا PM می‌گویند. در کاربردهای خانگی آبگرمکن خورشیدی، دمای آب سرد ورودی، دمای تنظیم آب گرم، دمای محیط بیرون، طول روز و میزان ابرناکی از پارامترهای فنی و اقلیمی مهم در میزان استحصال انرژی خورشیدی هستند. از طرفی، میزان آب گرم مصرفی، زمان مصرف (الگوی مصرف)، از عوامل انسانی (متأثر از رفتار اشخاص ساکن در واحد مسکونی) می‌باشند که چندان قابل پیش بینی نیستند. به هر حال بایستی آب گرم مصرفی طبق الگوی مصرف خانوار بموقع تأمین شود به طوری که حدود ۲۰۰ لیتر آب گرم 45°C در شبانه‌روز در مخزن تهیه شود. به عبارتی، بایستی کلید زمانکار به نحوی فعال شود که گرمکن الکتریکی فرصت تأمین این مقدار آب گرم را داشته باشد حتی اگر آفتاب (چشمه انرژی

1. Manual Key
2. Permanente Mode

جدول (۱): عملکرد چند روزه دی‌ماه آبگرمکن خورشیدی در مدار دائمی (PM) و زمانکار (TM) مدار المنت و در شرایط دمای تنظیم آب گرم $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$.

روز	مد کار	بیشینه کمینه هوا (°C)	آب گرم روز lit	برق روز kWh	آب گرم شب lit	برق شب kWh	آب گرم کل lit	برق کل kWh
۱	PM	۸ تا ۲-	۴۳۰	۱۱/۵	۱۸۰	۷/۵	۶۱۰	۱۹
۲	PM	۱۱ تا ۸	۲۵۰	۱۰/۹	۱۳۰	۴	۳۸۰	۱۴/۹
۳	PM	۱۵ تا ۴	۴۱۰	۷/۳	۱۸۰	۶/۳	۵۹۰	۱۳/۶
۴	PM	۱۳ تا ۲-	۱۰۰	۲	۷۰	۳/۱	۱۷۰	۵/۱
۵	PM	۱۶ تا ۴	۱۹۰	۳	۹۰	۳/۴	۲۸۰	۶/۴
۶	TM	۱۵ تا ۳	۱۸۰	۲/۲	۱۰۰	۲/۸	۲۸۰	۵
۷	TM	۸ تا ۲-	۱۶۰	۱/۴	۹۰	۳/۴	۲۵۰	۴/۸
۸	TM	۱۴ تا ۰	۱۱۰	۰/۸	۸۰	۳	۱۹۰	۳/۸
۹	TM	۲۲ تا ۶	۲۸۰	۲	۱۲۰	۳/۶	۴۰۰	۵/۶

* روز کاملاً ابری

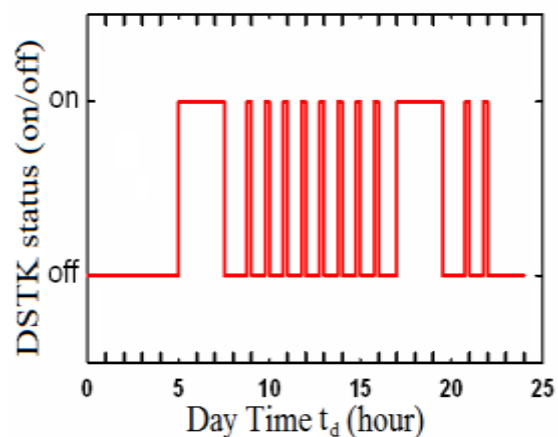
به منظور ارزیابی تأثیر کلید زمانکار مدار المنت برقی و دمای تنظیم آب بر عملکرد آبگرمکن خورشیدی برقی مذکور، منحنی تغییرات برق مصرفی روزانه سیستم پشتیبان DELE^۱ برحسب آب گرم مصرفی روزانه DHWD^۲ در طول ماه‌های فروردین- اردیبهشت (برای دمای تنظیم آب $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$) و دی‌ماه (برای دو دمای تنظیم آب $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$ و $T_{HWS} = 45^{\circ}\text{C}$) در شکل (۶- الف و ب و ج) نشان داده شده است (نمادها نشانگر نتایج تجربی و منحنی‌ها رگرسیون مرتبه دو هستند). در شکل (۶- الف)، برق مصرفی روزانه آبگرمکن، در مد زمانکار DELETM و در مد دائمی DELE^{PM} برحسب آب گرم مصرفی روزانه DHWD در ماه‌های آوریل و می (فروردین و اردیبهشت) در شرایطی که دمای تنظیم آب گرم برابر با $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$ بوده، رسم شده است. متناظراً شکل (۶- ب)، نتایج اندازه‌گیری شده در ماه‌های دسامبر و ژانویه (دی‌ماه) را نشان می‌دهد. از مقایسه آن‌ها درمی‌یابیم که اولاً برق مصرفی با افزایش مقدار آب گرم مصرفی افزایش می‌یابد، ثانیاً برق مصرفی در مد زمانکار کمتر از مد دائمی است و ثالثاً برق مصرفی در ماه‌های سرد (دی‌ماه) به مراتب بیش از ماه‌های گرم (فروردین و اردیبهشت) است و دلایل آن، کاهش انرژی تابشی خورشید، کاهش دمای آب سرد ورودی به آبگرمکن، افزایش اتلاف گرمای مخزن آبگرمکن و مهم‌تر از همه افزایش نیاز ساکنان به استفاده از آب گرم در زمستان است.

از غروب به مدت ۲/۵ ساعت روشن گشته تا آب گرم پیک مصرف اصلی شامگاه تأمین شود و سپس تا ساعت ۲۲ به مدت ۱۵ دقیقه در هر ساعت روشن بوده است.

۴. نتایج میدانی و بحث

میزان برق و آب گرم مصرفی در شب و در روز با قرائت کنتورهای مربوط، به ترتیب رأس ساعت ۷/۵ و ۱۹/۵ اندازه‌گیری شدند. برای مقایسه نتایج میدانی برق مصرفی آبگرمکن خورشیدی، مدار گرمکن الکتریکی آن توسط کلید DSTK به تناوب یک هفته در مد زمانکار TM و در هفته بعد توسط کلید MK (کلید دستی) در مد کاری دائمی PM فعال بوده است. در جدول (۱) نمونه‌ای از نتایج میدانی به دست آمده در چند روز دی‌ماه در شرایطی که دمای تنظیم آب گرم T_{HWS} در 55°C بوده، لیست شده است. نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که آب گرم مصرفی در طول روز بیش از آب گرم مصرفی شب است، به علاوه اینکه برق مصرفی (در روز و یا شب) به میزان آب گرم مصرف شده (در روز و یا شب) بستگی دارد. بخشی از برق مصرفی شب به گرمایش آب مربوط است و بخشی از آن ناشی از اتلاف گرما از مخزن آبگرمکن است. از مقایسه نتایج روزهای ۱ و ۲ تأثیر میزان آفتاب روزانه در گرمایش آب مصرفی روز مشخص می‌شود و از مقایسه نتایج روزهای ۵ و ۶ (و نیز ۴ و ۸) فهمیده می‌شود که مد زمانکار باعث کاهش مصرف برق آبگرمکن شده است.

به طور کلی برق مصرفی در شبانه‌روز به وسیله سیستم پشتیبان نه تنها به مقدار آب گرم مصرفی شبانه‌روز بستگی دارد، بلکه مد کاری مدار المنت، میزان ابرناکی، ماه از سال و دمای تنظیم آب گرم نیز تأثیر بسزایی دارند.



شکل (۵): نمودار زمانی وضعیت (وصل یا قطع) کلید زمانکار DSTK در طول شبانه‌روز در مطالعه میدانی

1. Daily Electrical Energy
2. Daily Hot Water Draw
3. Daily Electrical Energy in Timing Mode
4. Daily Electrical Energy in Permanent Mode

نتایج مشابه اندازه‌گیری شده در ماه‌های دسامبر و ژانویه (دی‌ماه) برای حالتی که دمای تنظیم آب گرم $T_{HWS} = 45^{\circ}\text{C}$ بود، در شکل (۶-ج) نشان داده شده است. از مقایسه شکل (۶-ب و ج) فهمیده می‌شود که مصرف برق آبگرمکن در مدهای متناظر کمتر از شرایطی است که دمای تنظیم آب گرم $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$ بوده و دلیل این اختلاف، به اتلاف کمتر گرما از مخزن آب گرم در شرایط $T_{HWS} = 45^{\circ}\text{C}$ مربوط است. از طرفی هرچه دمای تنظیم آب گرم مخزن کمتر باشد، اتلاف گرما از مخزن آن کمتر و به تبع راندمان آبگرمکن خورشیدی بیشتر و در نتیجه سهم خورشید در گرم کردن آب بیشتر است و به تبع سهم المنت برقی کمتر خواهد بود.

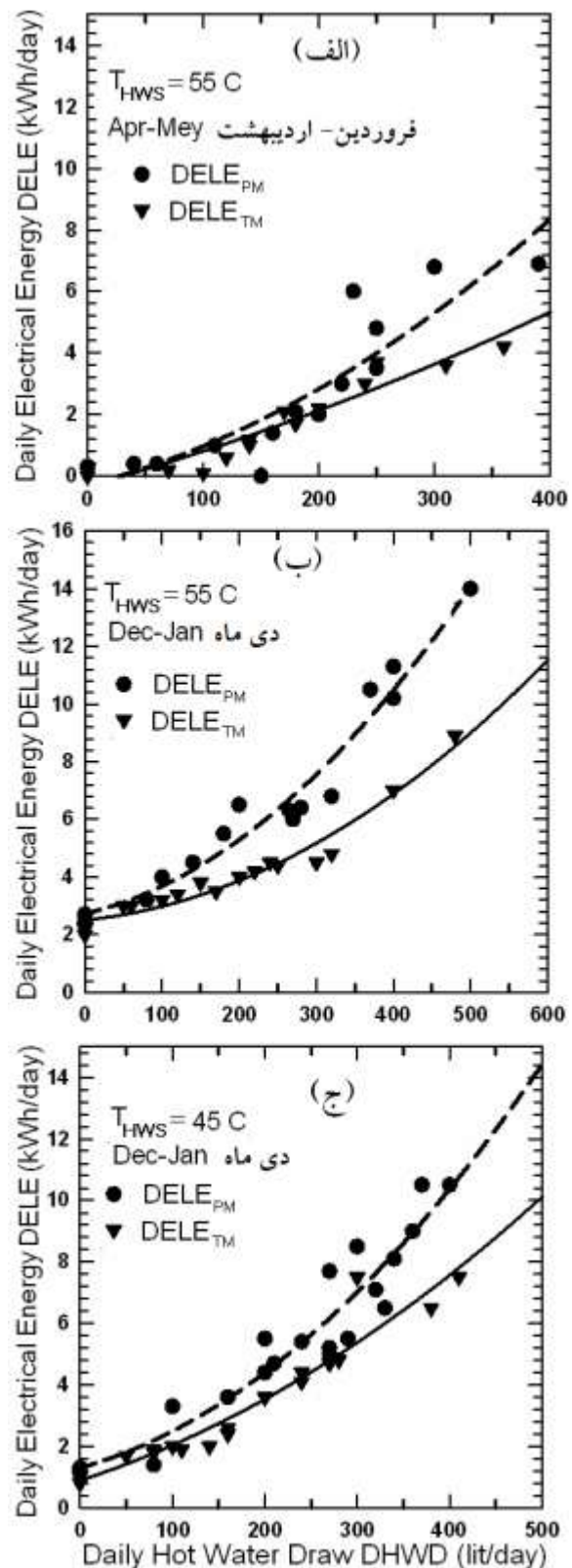
نکته دیگر اینکه محل برخورد منحنی‌های مذکور با محور عمودی (متناظر با شرایط عدم مصرف آب گرم)، مشخصه میزان اتلاف گرما از مخزن آبگرمکن است که با نتایج شکل (۲) همخوانی کامل وجود دارد.

۵. ممیزی انرژی و کارایی آبگرمکن خورشیدی

به‌منظور ممیزی انرژی و ارزیابی تأثیر کلید زمانکار بر عملکرد ماهیانه آبگرمکن خورشیدی برقی تحت مطالعه، برق مصرفی ماهیانه سیستم پشتیبان در مد زمانکار $MELE_{TM}^1$ و در مد دائمی $MELE_{PM}^2$ اندازه‌گیری شده در ماه‌های مختلف سال درحالی که دمای تنظیم آب گرم برابر با $T_{HWS} = 55^{\circ}\text{C}$ بود در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. از شکل پیداست که برق مصرفی آبگرمکن در مد زمانکار در همه ماه‌های سال کمتر از مد دائمی می‌باشد. نکته قابل ذکر این است که اختلاف برق مصرفی در مدهای مذکور در ماه‌های تابستان ناچیز ولی در ماه‌های سرد قابل ملاحظه می‌گردد. به‌عبارتی هرچند در تابستان عملکرد مد زمانکار تقریباً بی‌تأثیر است، نقش کلید زمانکار بر عملکرد آبگرمکن خورشیدی در زمستان حائز اهمیت می‌باشد. انرژی خالص آب گرم مصرفی شده ماهیانه $MHWNE^3$ با اندازه‌گیری حجم آب گرم مصرفی ماهیانه V_{MW}^4 (با قرائت ماهیانه کنتور آب) و اندازه‌گیری متوسط دمای آب سرد ورودی به آبگرمکن T_{MCW}^5 طبق رابطه زیر (برحسب کیلووات ساعت) محاسبه شد:

$$MHWNE = V_{MW} \times 4160 \times (T_{HWS} - T_{MCW}) / 3600 \quad (1)$$

و بر این اساس مقدار ماهیانه انرژی خورشیدی (استحصالی) به‌وسیله آبگرمکن خورشیدی در مد زمانکار MSE_{TM}^6 و در مد دائمی MSE_{PM}^7



شکل (۶): مقایسه برق مصرفی روزانه به‌وسیله آبگرمکن خورشیدی برحسب مقدار آب گرم مصرف شده در مد دائمی و مد زمانکار مدار گرمکن الکتریکی در روزهای آفتابی: الف. در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و دمای آب گرم 55°C ؛ ب. در دی‌ماه و دمای آبگرم 55°C و ج. در دی‌ماه و دمای آب گرم 45°C

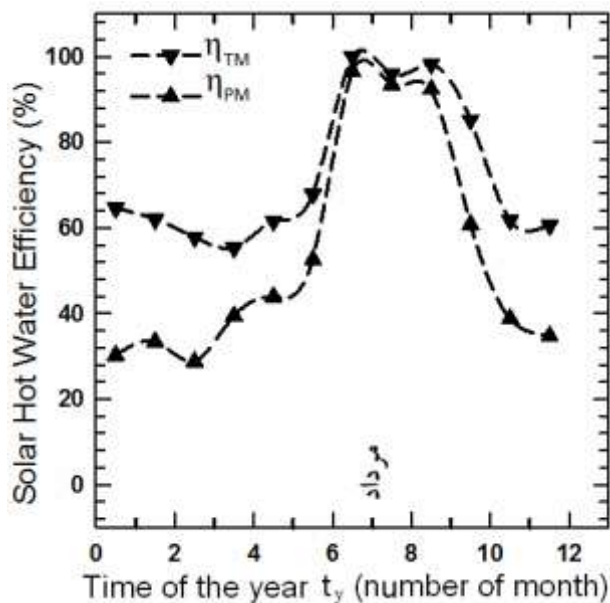
1. Monthly Electrical Energy in Timing Mode
2. Monthly Electrical Energy in Permanent Mode
3. Monthly Hot Water Net Energy
4. Monthly consumed Water Volume
5. Monthly Cold Water Temperature
1. Monthly Solar Energy in Timing Mode
2. Monthly Solar Energy in Permanent Mode

حدی به کاهش دمای آب سرد ورودی به آبرگرمکن در زمستان مربوط است. خلاصه، از نتایج این شکل پیداست که میزان برق مصرفی در مد زمانکار همواره کمتر از مد دائمی بوده و در مقابل، سهم خورشیدی در حالتی که مدار گرمکن الکتریکی به صورت زمانکار فعال شده باشد بیش از مد دائمی است، همچنین تأثیر مد زمانکار (بر کاهش مصرف برق آبرگرمکن) در ماه‌های سرد سال بیشتر است.

مشابه با کسر (سهم) خورشیدی در مرجع [۷]، با تعریف کارایی آبرگرمکن خورشیدی η به صورت زیر:

$$\eta = \frac{\text{Solar Energy}}{\text{Net Water Energy}} \times 100 \quad (۴)$$

می‌توان به ارزیابی آن در ماه‌های مختلف سال (یا در طول سال) پرداخت. بر این اساس، تغییرات کارایی آبرگرمکن خورشیدی در ماه‌های مختلف سال برای مدهای دائمی η_{PM} و زمانکار η_{TM} محاسبه و در شکل (۸) نشان داده شده است. از نتایج برمی‌آید که اولاً کارایی آبرگرمکن خورشیدی فقط در سه ماه تابستان مطلوب (بیشینه) است، ثانیاً کارایی آبرگرمکن در شرایطی که مدار المنت در مد زمانکار فعال شده باشد همواره بیش از مد دائمی بوده، ثالثاً اختلاف آن‌ها در ماه‌های تابستان کم، ولی در ماه‌های سرد قابل ملاحظه است.



شکل (۸): تغییرات کارایی آبرگرمکن خورشیدی برقی تحت مطالعه در مدهای کاری دائمی η_{PM} و زمانکار η_{TM} در ماه‌های مختلف سال (میلادی)

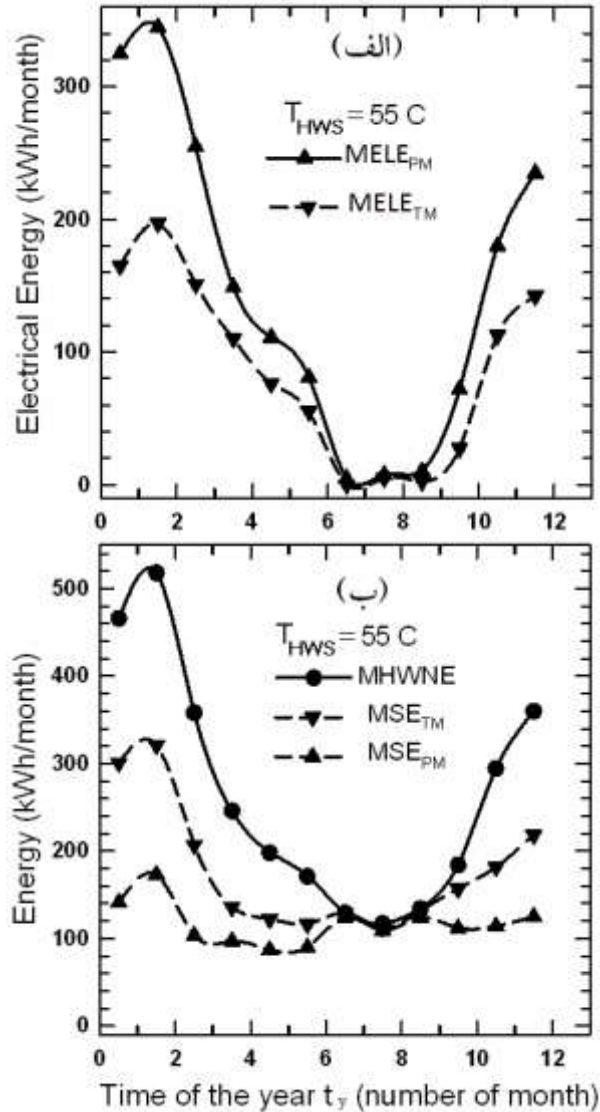
در خاتمه، نتایج میدانی انرژی خالص آب‌گرم مصرف‌شده سالیانه، انرژی الکتریکی مصرفی به وسیله سیستم پشتیبان، سهم خورشید و سهم المنت (انرژی الکتریکی) در گرمایش آب و درصد آن‌ها در جدول (۲) آمده است که می‌رساند وقتی مدار گرمکن الکتریکی

برابر با اختلاف انرژی آب‌گرم شده (خروجی از آبرگرمکن) و برق مصرفی به وسیله المنت، به صورت زیر محاسبه شد:

$$MSE_{TM} = MHWNE - MELE_{TM} \quad (۲)$$

$$MSE_{PM} = MHWNE - MELE_{PM} \quad (۳)$$

و نتایج میدانی به دست آمده در ماه‌های مختلف سال در شکل (۷-ب) نشان داده شده است.



شکل (۷): مقایسه برق مصرفی ماهیانه سیستم پشتیبان آبرگرمکن

خورشیدی برقی: در مد دائمی $MELE_{PM}$ و در مد زمانکار $MELE_{TM}$; ب. انرژی خالص آب‌گرم مصرفی ماهیانه $MHWNE$ ، انرژی خورشیدی استحصالی ماهانه: در مد دائمی MSE_{PM} و در مد زمانکار MSE_{TM} در طول سال (میلادی) در شرایطی که دمای تنظیم آب‌گرم 55°C بوده است.

از بررسی انرژی خالص آب‌گرم مصرف‌شده ماهیانه فهمیده می‌شود که انرژی آب مصرفی در زمستان ۳ برابر تابستان است و دلیل آن تمایل ساکنان به استفاده از آب‌گرم در زمستان بیش از تابستان و تا

هر چند در این پژوهش از کلید زمانکار صنعتی موجود در بازار (با حداقل بازه زمانکاری ۱۵ دقیقه) استفاده شده است، به کارگیری کنترل‌گرهای منطقی برنامه‌پذیر^۱ مجهز به کلید رله [۱۱، ۱۲ و ۲۰]، با بازه زمانکاری کوتاه‌تر می‌تواند موجب افزایش بیشتر کارایی آبرگرمکن‌های مذکور شود.

سپاسگزاری

این پژوهش عمدتاً برگرفته از نتایج طرح پژوهشی «آسیب‌شناسی عدم توسعه آبرگرمکن‌های خورشیدی و راهکارهای رفع آن‌ها» است و نویسنده از واحد تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای یزد تشکر می‌کند.

فهرست علائم

t_d	زمان از روز (h)
t_y	زمان از سال ($month$)
$DHWD$	آب مصرفی روزانه (lit/day)
$DELE$	برق مصرفی روزانه (kWh/day)
$MELE$	برق مصرفی ماهیانه ($kWh/month$)
$MHWNE$	انرژی آب گرم ماهیانه ($kWh/month$)
V_{MW}	آب مصرفی ماهانه ($lit/month$)
MSE	انرژی خورشید استحصالی ماهانه ($kWh/month$)

علائم یونانی

η کارایی (%)

زیرنویس‌ها

WT	تانک (مخزن) آب گرم
HWS	تنظیم آب گرم
PM	مد دائمی
TM	مد زمانکار
MCW	آب سرد ماهانه
MW	آب مصرفی ماهانه
d	روزانه
y	سالانه

آبرگرمکن خورشیدی به‌صورت زمانکار (در مقایسه مد دائمی) فعال شود: اولاً سهم المنت برقی کاهش، و سهم خورشید افزایش داشته و ثانیاً کارایی سالیانه آبرگرمکن خورشیدی برقی η_y از ۴۴٪ به ۶۷٪ افزایش می‌یابد. از جنبه کاربردی، استفاده از کلید زمانکار (۵۰ دلار) در مدار المنت آبرگرمکن نه تنها ساده بلکه موجب صرفه‌جویی سالیانه $700 kWh$ برق (معادل ۴۰٪) می‌گردد که با احتساب هر کیلووات ساعت معادل ۰/۱۵ دلار فهمیده می‌شود که زمان برگشت سرمایه کمتر از یک سال است.

جدول (۲): ممیزی انرژی و کارایی سالیانه آبرگرمکن خورشیدی برقی η_y در مد زمانکار و مد دائمی در مطالعه میدانی انجام‌شده در دوره ۳ ساله

مد کاری	انرژی آب گرم سالانه kWh	برق مصرفی سالانه kWh	انرژی خورشید سالانه kWh	سهم المنت %	سهم خورشید %	کارایی سالانه η_y
زمانکار	۳۱۷۵	۱۰۴۳	۲۱۳۰	۳۳	۶۷	۶۷
دائمی	۳۱۷۵	۱۷۷۵	۱۳۹۸	۵۶	۴۴	۴۴

۶. نتیجه‌گیری

انرژی تابش خورشید یکی از منابع پاک و تجدیدپذیر بوده که استفاده از آن نیاز حال و آینده بشر است. کشور پهناور ایران دارای متوسط سالانه ۳۰۰ روز آفتابی و ۲۸۵۰ ساعت آفتاب از این پتانسیل بالقوه برخوردار است. آبرگرمکن‌های ترموسیفونی خورشیدی به‌رغم سادگی و مزایای ویژه نمی‌توانند در دوره سرد سال آب گرم مصرفی مورد نیاز خانوار را تأمین کنند و لذا نیازمند سیستم پشتیبانی چون گرمکن الکتریکی مقاومتی (المنت برقی) هستند تا دمای آب بالای مخزن آبرگرمکن را در حد مطلوب $45-55^\circ C$ گرم نگه دارد. کاهش انرژی مصرفی به‌وسیله المنت (سیستم پشتیبان) نه تنها باعث کاهش بار شبکه توزیع برق شده بلکه باعث افزایش کارایی آبرگرمکن خورشیدی و ترویج آن‌ها در بخش ساختمان می‌شود. از آنجا که بخشی از برق مصرفی سیستم پشتیبان ناشی از اتلاف گرما از مخزن آبرگرمکن است، کاهش دمای تنظیم آب گرم موجب افزایش کارایی آبرگرمکن می‌شود. همچنین زمان‌بندی مناسب روزانه وصل بودن مدار المنت برقی به کمک کلید تایمر (مد کاری زمانکار) موجب کاهش سهم پشتیبان در مقایسه با وضعیت اتصال پیوسته مدار مذکور (مد کاری دائمی) می‌شود. نتایج میدانی مؤید این است که استفاده از کلید زمانکار روزانه در دوره سرما به‌طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر بوده و باعث صرفه‌جویی سالانه $700 kWh$ برق و افزایش کارایی سالیانه آبرگرمکن ترموسیفونی خورشیدی - برقی از ۴۴٪ به ۶۷٪ شد.

- [۱] هادی پور، محمد و عامری، مهران، «ارزیابی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تابش خورشیدی روزانه کشور ایران»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۴، شماره ۳، صفحه ۳۸-۴۷، ۱۳۹۳.
- [2] Gautam, A., Chamoli, S., Kumar, A., Singh, S., "A Review on Technical Improvements, Economic Feasibility and World Scenario of Solar Water Heating System", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, 541-562, 2017.
- [۳] صادق‌زاده، محمدعلی، «آسیب‌شناسی عدم توسعه آبگرمکن‌های خورشیدی در ایران»، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۹، شماره ۴، صفحه ۴۹-۶۶، ۱۳۹۵.
- [4] Sadeghzadeh, M. A., "Thermosiphon Heat Pump for Pipe Freeze Preventing of Domestic Passive Solar Water Heaters", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 5, 053102, 2012.
- [5] Biaoou, A. L., Bernier, M. A., "Achieving Total Domestic Hot Water Production with Renewable Energy", *Building and Environment*, Vol. 43, No. 4, 651-660, 2008.
- [6] Shariah, A. M., Löf, G. O. G., "Effect of Auxiliary Heater on Annual Performance of Thermosiphon Solar Water Heater Simulated Under Variable Operating Conditions", *Solar Energy*, Vol. 60, No. 2, 119-126, 1997.
- [7] Shariah, A., M., Ecvit, A., "Effect of Hot Water Load Temperature on the Performance of a Thermosiphon Solar Water Heater with Auxiliary Electric Heater", *Energy Conversion and Management*, Vol. 36, No.5, 289-296, 1995.
- [8] Shariah, A. M., Löf, G. O. G., "The Optimization of Tank-Volume-to-Collector-Area Ratio for a Thermosiphon Solar Water Heater", *Renewable Energy*, Vol. 7, No. 3, 289-300, 1996.
- [9] Dehghan, A. A., "Status and Potentials of Renewable Energies in Yazd Province-Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No.3, 1491-1496, 2011.
- [10] Taherian, H., Rezania, A., Sadeghi, S., Ganji, D. D., "Experimental Validation of Dynamic Simulation of a Flat Plate Collector in a Closed Thermosiphon Solar Water Heater", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No.1, 301-307, 2011.
- [11] Ayompe, L. M., Duffy, A., Mc Keever, M., Colon, M., McCormack, S. J., "Comparative Field Performance Study of Flat Plate Tube and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors (ETCs) for Domestic Water Heating Systems in a Temperature Climate", *Energy*, Vol. 36, No. 5, 3370-3378, 2011.
- [12] Ayompe, L. M., Duffy, A., "Thermal Performance Analysis fo a Solar Water Heating System With Heat Pipe Evacuated Tube Collector Using Data From a Field Trial", *Solar Energy*, Vol. 90, 17-28, 2013.
- [13] Ogueke, N. V., Anyanwu, E. E., Ekechukwu, O. V., "A Review of Solar Heating Systems", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 1, No. 4, 043106, 2009.
- [14] Cruickshank, C. A., Harrison S. J., "Heat Loss Characteristics for a Typical Solar Domestic Hot Water Storage", *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 10, 1703-1710, 2010.
- [15] Michaelides, I., Eleftheriou, P., Siamas, G. A., Roditis, G., Kyriacou, P., "Experimental Investigation of the Night Heat Losses of Hot Water Storage Tanks in Thermosiphon Solar Water Heaters", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 3, 033103, 2011.
- [۱۶] صادق‌زاده، محمدعلی، «آسیب‌شناسی عدم توسعه آبگرمکن‌های خورشیدی و راهکارهای رفع آن‌ها»، طرح پژوهشی شماره ۸۳/۳۵۶/۱ شرکت برق منطقه‌ای یزد- دانشگاه یزد، ۱۳۹۴.
- [17] Hang, Y., Qu, M., Zhao, F., "Economic and Environmental Life Cycle Analysis of Solar Hot Water Systems in the United States", *Energy and Buildings*, Vol. 45, 181-188, 2012.
- [18] Evarts, J. C., Swan, L. G., "Domestic Hot Water Consumption Estimates for Solar Thermal System Sizing", *Energy and Buildings*, Vol. 58, 58-65, 2013.
- [19] Singh, R., Lazarus, M., Solitis, M., "Recent Developments in Integrated Collector Storage (ICS) Solar Water Heaters: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, 270-298, 2016.
- [20] Ayompe, L. M., Duffy, A. ., McCormack, S. J., Conlon, M., "Validated TRNSYS Model for Forced Circulation Solar Water Heating Systems with Flat Plate and Pipe Evacuated Tube Collectors", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 8-9, 1536-1542, 2011.