



ارزیابی انرژی و اقتصادی پیاده سازی سیستم تولید چندگانه خورشیدی دارای متمرکز کننده در یک ساختمان مسکونی

مهرداد خادمی^۱، علیرضا سرائی^{۲*}، محمدحسن جلال‌الدین ایبانه^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۱۴۰۰-۹-۲۰: تاریخ پذیرش ۱۴۰۰-۶-۱۵: تاریخ دریافت

چکیده: هدف این مقاله ارزیابی عملکرد انرژی و اقتصادی سیستم متمرکز خورشیدی حرارتی فتوولتائیک (CPVT) تولیدکننده آب گرم، گرمایش و سرمایش برای یک ساختمان مسکونی واقع در تهران، ایران است. بازتابنده‌های خطی فرنل (LFC) و سلول‌های خورشیدی سه‌لایه جهت سیستم CPVT در نظر گرفته شده‌اند. یک چیلر جذبی ۵ کیلوواتی از نوع آمونیوم آب برای تأمین سرمایش با استفاده از انرژی حرارتی انتخاب شده است. مدل‌های پیشنهادی برای چیلر جذبی و LFC با استفاده از EES شبیه‌سازی شده‌اند. در صورت کمبود انرژی خورشیدی، گرمایش پشتیبان برای سیستم در نظر گرفته شده است. سیستم پیشنهادی از مخازن ذخیره‌سازی به‌عنوان ذخیره انرژی حرارتی (TES) در صورت در دسترس بودن بیش از حد انرژی خورشیدی استفاده می‌کند. CPVT با سلول‌های خورشیدی استاندارد، کلکتور حرارتی متمرکز، PVT با سلول‌های خورشیدی سه‌لایه، و PVT با سلول‌های خورشیدی رایج جهت تحلیل بهتر این سیستم بررسی شده است. شبیه‌سازی گذرا از این سیستم‌ها در TRNSYS انجام شده است. سیستم پیشنهادی ۴۸ درصد از انرژی مورد نیاز ساختمان را به همراه تأمین ۵,۵۸ مگاوات ساعت توان الکتریکی تأمین می‌کند. سازه پیشنهادی بیشترین جذابیت اقتصادی را در مقایسه با سیستم‌های خورشیدی فوق‌الذکر دارد. برای این سیستم نرخ بازده داخلی ۱۲٪ (IRR)، نسبت سود به هزینه ۱۵۹ (BCR)٪ و هزینه‌های انرژی معادل ۰,۰۱۸ دلار در کیلووات‌ساعت است. ترکیب دو CPVT در یک پیکربندی موازی، مصرف انرژی کلی ساختمان را تا ۷۴٪ کاهش می‌دهد، اما ۴۲٪ سرمایه‌گذاری اولیه بالاتر نیاز دارد که IRR را ۱٪ کاهش می‌دهد. هزینه کم‌انرژی عامل بسیار مهمی است که باعث می‌شود زمان بازگشت سرمایه سیستم به ۷/۸ سال برسد.

واژه‌های کلیدی: کلکتور فتوولتائیک حرارتی دارای متمرکزکننده، تولید سه‌گانه، ارزیابی اقتصادی، تولید هم‌زمان برق و حرارت، سیستم انرژی، چیلر جذبی لیتیوم بروماید آب تک اثره.

۱. مقدمه

مدت کوتاهی پس از انقلاب صنعتی، الگوی مصرف انرژی در جهان به طرز چشمگیری تغییر کرد [۱]. قبل از انقلاب صنعتی، تعادلی بین تولید انرژی روی زمین و مصرف انرژی وجود داشت. انرژی فتوسنتز گیاهی تولید شده به عنوان زغال سنگ به طور مستقیم یا به عنوان نفت به طور غیرمستقیم استفاده یا ذخیره می شد. پس از صنعتی شدن، بشریت با استفاده از انرژی ذخیره شده گذشته بیش از آن که بتواند جایگزین شود، تعادل را تغییر داد. اگرچه مدت زیادی از این زمان نگذشته بود، دانشمندان زغال سنگ و منابع نفت را منابع انرژی تجدیدناپذیر نامیدند. باین حال، چرخه های آبی و آسیاب های بادی اولین انواع انرژی های تجدیدپذیر بودند که انرژی مکانیکی تأمین می کردند. ویلیام گریلز آدامز توانایی سلول های سلیسیم برای تولید الکتریسیته را به عنوان اولین روش مدرن جهانی برای تولید انرژی های تجدیدپذیر در سال ۱۸۷۶ ارائه کرد [۲]. اندکی بعد، سایر منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. اما هزینه اولیه این سیستم ها آنها را کنار گذاشت تا اینکه شواهدی از فرضیه Svante Arrhenius مبنی بر اینکه «فعالیت های انسانی، تولیدکننده دی اکسید کربن باعث گرم شدن کره زمین می شود» را تأیید کرد. [۳]. در مقایسه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی از مزیت در دسترس بودن در اکثر نقاط برخوردار است. صنعتی شدن سریع و رشد جمعیت چالش های بزرگ جهانی را به ویژه در ایران ایجاد کرده است [۴-۶].

دو روش اصلی برای تولید انرژی از انرژی خورشیدی، کلکتورهای حرارتی خورشیدی و پانل های الکتریکی خورشیدی (PV) هستند. باتوجه به تجهیزات نسبتاً کم هزینه تر و عملکرد کلکتورهای حرارتی خورشیدی بالاتر در مقایسه با کلکتورهای PV، استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی مقرون به صرفه تر است [۷]. برای افزایش بازدهی این سیستم، واحدهای متمرکز می توانند افزوده شوند. کلکتورهای حرارتی خورشیدی متمرکز دماهای بالاتر و هزینه کمتری نسبت به سیستم معمولی دارند. کواشینگ تحلیل اقتصادی و فنی مقایسه ای را میان سیستم های تولید الکتریسیته حرارتی دارای متمرکزکننده را در مقایسه با سیستم PV ارائه کرد. نتایج حاکی از تولید ۱۷ درصد توان بالاتر سیستم حرارتی خورشیدی متمرکز است [۸]. روش پیشنهادی دیگر برای بهبود کارایی سیستم خورشیدی، ترکیب PV و کلکتورهای حرارتی (PVT) است. در این سیستم انرژی تولیدی ترکیبی از انرژی الکتریکی و حرارتی است [۹]. بازده سلول فتوولتائیک تابع تابش خورشیدی و دمای سلول است. در نتیجه، کاهش دمای سلول با استخراج انرژی حرارتی سیستم PVT منجر به افزایش بازده الکتریکی کلی می شود [۱۰]. برای بهره گیری از سیستم های متمرکز و PVT که به ساختار CPVT معروف هستند علاوه بر تأمین انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی با کیفیت بالا، به دلیل کاهش سطح صفحه جذب کلکتور، هزینه کمتری نیز دارد. کیفیت بالای انرژی حرارتی در یک سیستم CPVT به دمای سلول بالاتر و راندمان الکتریکی پایین تر می انجامد. سلول خورشیدی سه لایه وابستگی کم بازده به دما، انتخاب مناسبی برای سیستم های CPVT است [۱۲].

کیفیت بالای انرژی حرارتی در یک سیستم CPVT این ساختار را برای تأمین انرژی طیف وسیعی از کاربردها مناسب می نماید. CPVT انرژی حرارتی و الکتریکی تولید می کند، اما انرژی حرارتی می تواند جهت سیستم های: هیدروژن، خنک کننده، خشک کردن و غیره مورد استفاده قرار گیرد. میتمن و همکاران به بررسی جذب تک اثر همراه با CPVT برای خنک سازی پرداخته اند. این مطالعه نشان می دهد که قدرت سیستم خنک کننده دارای CPVT در برخی موارد یکسان و حتی از نظر اقتصادی بهتر از سیستم معمولی است [۱۳]. در مطالعه دیگری که توسط میتمن و همکاران انجام شد. یک سیستم نمک زدایی آب که توسط CPVT تحلیل شده است. این تحقیق نشان می دهد که سیستم CPVT نسبت به سایر انواع سیستم های خورشیدی برای این سیستم

تقطیر برتری مطلق دارد و می‌تواند در برخی موارد مقرون‌به‌صرفه‌تر از سیستم‌های معمولی باشد [۱۴]. بوئونومانو و همکاران شبیه‌سازی سیستم گرمایش و سرمایش ترکیبی برای یک ساختمان واقع در ایتالیا را مطالعه نموده‌اند. طرح پیشنهادی برای این شبیه‌سازی مجموعه‌ای از چیلرهای جذبی تک‌مرحله‌ای LiBr-H₂O دارای تأمین انرژی خورشیدی متمرکز و PVT است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که سازه پیشنهادی انرژی بیش از اندازه کافی برای پاسخگویی به نیازهای انرژی ساختمان را فراهم می‌کند [۱۵]. هوروات و همکاران به مطالعه شرایط کاری برای یک سیستم تولید سه‌گانه با انرژی خورشیدی که برای تأمین ساختمان‌های مسکونی در نظر گرفته شده است پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از این سیستم می‌تواند باعث کاهش وابستگی به شبکه انرژی ساختمان‌های واقع در اروپا شود [۱۶]. دیمی دشت بیاز و همکاران. مطالعه‌ای بر روی مدل‌سازی یک سیستم حرارتی فتوولتائیک خورشیدی دارای یک متمرکزکننده همراه با یک پمپ حرارتی انجام داده‌اند. محل آزمایش مشهد، ایران است و نتایج مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی تأیید شده است. در این تحقیق بیان شده است که با افزایش دبی نانوسیال، دمای پنل فتوولتائیک و سیال خروجی کاهش می‌یابد که باعث افزایش راندمان الکتریکی و حرارتی می‌شود، اما درعین حال بازده انرژی سیستم کاهش می‌یابد [۱۷]. بررسی دیگری که نمایش‌دهنده بهبود عملکرد حرارتی - اقتصادی سیستم تولید سه‌گانه است توسط کالیزه و همکاران انجام شده است. در سیستم پیشنهادی آنها از انرژی خورشیدی زیست‌توده و زمین گرمایی برای تأمین انرژی سیستم استفاده می‌شود. محصولات این سازه گرمایش، سرمایش و الکتریسیته است. این تحلیل همچنین از یک چرخه رانکین آلی برای تولید الکتریسیته استفاده می‌کند. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار TRNSYS انجام شده است. محل مطالعه ناپل در جنوب ایتالیا است. نویسندگان بیان می‌کنند که چنین سیستمی منجر به ۱۳۹ درصد صرفه‌جویی در انرژی می‌شود که این مقدار به سبب تولید انرژی بیشتر از نیاز است و دوره بازگشت سرمایه ۱۹ ساله بیان شده است [۱۸]. در تحقیقات ارائه شده توسط لئونفورت و همکاران، طراحی جدیدی برای ساختار یک پمپ حرارتی که توسط یک سیستم کلکتور حرارتی فتوولتائیک خورشیدی تغذیه می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفته است. از این سازه برای تأمین سرمایش، گرمایش و آب گرم یک ساختمان مسکونی استفاده شده است. نتایج این مطالعه افزایش راندمان الکتریکی و حرارتی کلکتور و عملکرد فصلی پمپ حرارتی را نشان می‌دهد. همچنین میزان برق مبادله شده با شبکه در این شرایط کاهش می‌یابد. نویسندگان ادعا می‌کنند که این سیستم برای ساختمان‌های مسکونی کربن صفر مناسب است [۱۹]. چن و همکاران بهینه‌سازی چندمنظوره یک سیستم تولید سه‌گانه CPVT ارائه شده برای تأمین انرژی برای یک ساختمان اداری از دیدگاه‌های زیست‌محیطی، انرژی و اقتصادی را ارائه نموده‌اند. نکته قابل توجه نتایج این مطالعه ۴۱٫۴٪ و ۴۱٫۷٪ عملکرد انرژی بهتر و اثرات نامطلوب اکولوژیکی را نشان می‌دهد. سیستم پیشنهادی ۶۲ درصد گرمایش، ۵۴ درصد سرمایش و تنها ۳۰ درصد انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان را فراهم می‌کند [۲۰]. از این رو بررسی انرژی چنین سیستم‌هایی دارای اهمیت فراوانی است [۲۱].

سیستم‌های بر پایه انرژی خورشیدی مورد بررسی‌های بی‌شماری قرار گرفته است. اکثر این مطالعات بر روی روش‌های جمع‌آوری انرژی خورشیدی، مانند پیکربندی کلکتورهای حرارتی، PV، حرارتی متمرکز، CPV و CPVT تمرکز دارند. استفاده از این انرژی تولید شده از یک سیستم خورشیدی بر مبنای نیاز مصرف‌کننده زمینه مطالعاتی جدیدی را ایجاد کرد که در آن این انرژی تولیدی در سیستم‌های درهم‌تنیده مورد استفاده قرار می‌گیرد تا خروجی‌های مطلوب بر اساس نیاز ارائه شود. این سیستم‌ها به سه بخش عمده تقسیم می‌شوند: تولید هم‌زمان، سه‌گانه و چندگانه. در سال‌های اخیر، تولید دوگانه به دلیل توانایی آن در بهبود کارایی کلی سیستم‌ها توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده است. در نتیجه، این سیستم‌ها در حیطه انرژی خورشیدی شروع به رشد کرده‌اند. بر اساس نتایج تحقیقات، کارآمدترین کلکتور خورشیدی، کلکتور CPVT است. تعداد محدودی مطالعه بر روی ترکیبی

از کلکتورهای CPVT خورشیدی با سیستم‌های تولید چندگانه انجام شده است. دلیل اصلی این امر کاهش راندمان CPVT با افزایش دمای آن است. سلول خورشیدی سه‌لایه این مشکل را با راندمان الکتریکی بالاتر و کاهش وابستگی دمایی این پارامتر از سیستم‌های CPVT حل کرده است. این سیستم می‌تواند نیازهای انرژی یک ساختمان مسکونی را تأمین کند. در این حالت، سیستم تولید چندگانه می‌تواند شامل تأمین آب گرم، گرمایش هوا، و خنک‌کننده هوا، افزون بر تولید برق باشد. ساختارهای خنک‌کننده مختلف را می‌توان برای این منظور اتخاذ کرد. در میان آنها، چیلر جذب آب آمونیوم تک اثر به دلیل دمای کاری موردنیاز آن مطلوب‌تر به نظر می‌رسد. بر پایه آنچه نویسندگان از تحقیق‌ها در این زمینه اطلاع دارند مطالعه کاملی بر بررسی اقتصادی و انرژی یک سیستم تولید سه‌گانه دارای CPVT زیر بار یک ساختمان مسکونی به طور هم‌زمان برای دوره سالانه در تهران بسیار محدود است.

مطالعه حاضر به تحلیل یک سیستم خورشیدی تولید چندگانه خورشیدی برای یک ساختمان مسکونی واقع در غرب تهران، ایران می‌پردازد. در این مطالعه بازتابنده فرنل خطی (LFC) به‌عنوان واحد متمرکز کننده یک ساختار حرارتی فتوولتائیک متمرکزکننده (CPVT) مدل‌سازی می‌شود و چیلر تبرید جذبی تک اثر NH_3-H_2O نیز برای ارزیابی تولید انرژی خنک‌کننده سیستم مدل‌سازی می‌شود. مدل‌های ارائه‌شده در حل‌کننده معادلات مهندسی (EES) کدنویسی شده و برای شبیه‌سازی گذرا به TRNSYS منتقل می‌شوند. ساختمان مسکونی به‌صورت پویا در زیر برنامه TRN-build TRNSYS شبیه‌سازی شده است. اولین هدف این تحقیق ارزیابی پتانسیل سیستم خورشیدی پیشنهادی برای برآوردن نیاز انرژی ساختمان برای دستیابی به پایداری است. هدف دوم ارزیابی اقتصادی سیستم است. ارزیابی اقتصادی سیستم طی ۲۲ سال انجام شده است. انواع مختلفی از کلکتورهای خورشیدی در ساختار پیشنهادی به کار گرفته می‌شوند و تحلیل‌های مقایسه‌ای آن‌ها و طرح پیشنهادی انجام می‌شود.

۲- شرح مسئله و تحلیل ساختار

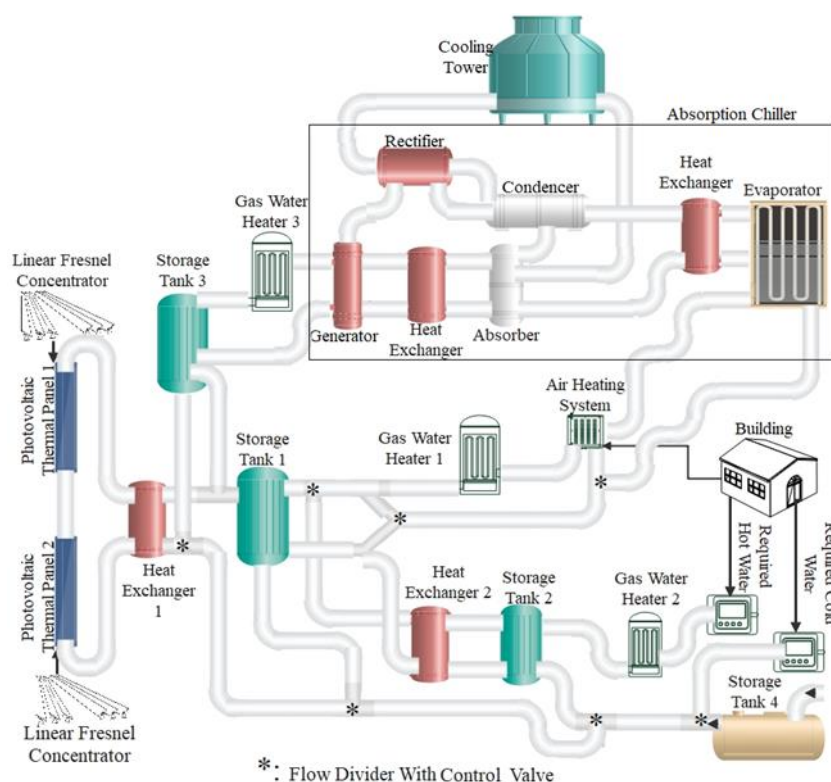
۲-۱. نحوه عملکرد ساختار مورد مطالعه

هدف سیستم پیشنهادی استفاده از انرژی خورشیدی برای تأمین سرمایش، گرمایش و آب گرم برای یک ساختمان مسکونی و تولید الکتریسیته برای فروش به شبکه است. سیستم پیشنهادی متشکل از بازتابنده‌های خورشیدی متمرکز است که پرتوهای خورشیدی را بر روی صفحه جذب‌کننده کلکتورها متمرکز می‌کند. صفحات جذب شامل پانل‌های فتوولتائیک هستند که بر روی یک صفحه جذب حرارتی نصب شده‌اند. ساختار صفحه جذب حرارتی شامل ده لوله است که در زیر یک صفحه که برای انتقال انرژی حرارتی به سیال عامل سیکل خورشیدی نصب شده‌اند. تولید الکتریسیته سیستم به شبکه فروخته می‌شود و تولید انرژی حرارتی سیستم خورشیدی بر اساس نیاز انرژی ساختمان به چرخه گرمایش یا سرمایش هدایت می‌شود. چرخه گرمایش پیشنهادی برای تأمین انرژی گرمایش تهویه مطبوع و آب گرم ساختمان در نظر گرفته شده است. دو گرمایش پشتیبان گازسوز کمکی در آب گرم خروجی و سیال عامل چرخه خورشیدی خروجی به تهویه مطبوع تعبیه شده‌اند تا در مواقعی که انرژی خورشیدی کافی نیست انرژی موردنیاز را تأمین کنند. یک سیکل چیلر جذبی تک اثر آمونیوم آب برای برآوردن نیاز سرمایشی ساختمان در نظر گرفته شده است. در هنگام نیاز سرمایش ساختمان، انرژی حرارتی سیکل خورشیدی به سمت ژنراتور چیلر جذبی هدایت می‌شود. در صورت ناکافی بودن انرژی خورشیدی، گرمایش پشتیبان گازسوز مازاد این انرژی را تأمین می‌نماید. زمانی که ساختار به گرمایش نیاز دارد سیال عامل سیکل خورشیدی به سمت سیکل گرمایش هدایت می‌شود. شکل ۱ شماتیک ساختاری این سیستم را نشان می‌دهد

متمرکزکننده خطی فرنل (LFC) به عنوان واحد متمرکزکننده سیستم در نظر گرفته می شود. مشخصات LFC اتخاذ شده در جدول ۱ ارائه شده است. دو عدد LFC برای این سیستم استفاده شده است. به موجب طول آینه، دو سری جاذب LFC برای هر واحد LFC در نظر گرفته شده است. جاذب LFC از یک پنل فتوولتائیک با سلولهای خورشیدی چند اتصالی و یک صفحه جاذب حرارتی تشکیل شده است. جدول ۲ پارامترهای سلول خورشیدی چندلایه را ارائه می دهد. نیتريد آلومینیوم با هدایت انتقال حرارت 1116 [kJ/hr m K] به منظور صفحه جاذب حرارتی در نظر گرفته می شود. مشخصات سیال عامل چرخه خورشیدی در جدول ۳ آورده شده است. مبدل های حرارتی اتخاذ شده در این سیستم دارای 700 [W/K] شرایط انتقال حرارت کل هستند.

چهار مخزن ذخیره سازی در ساختار پیشنهادی به کار گرفته شده است. مخازن ذخیره شماره ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱ شماتیک سیستم ذخیره انرژی حرارتی با حجم ثابت با عایق فوم پلی اورتان ۵ سانتی متری هستند. این لایه عایق مقاومت حرارتی $1.92 \text{ m}^2\text{K/W}$ برای مخازن ذخیره سازی ایجاد می کند [۲۴]. مخزن شماره ۴ ذخیره سازی حجم متغیر زیرزمینی است که برای تأمین آب ساختمان استفاده می شود.

در مواقعی که انرژی خورشیدی کافی نیست از سه گرمایش پشتیبان گازسوز برای تأمین انرژی استفاده می شود.



شکل (۱) شماتیک سیستم

جدول ۱. ویژگی‌های ماژول LFC [22]

پارامتر	طول (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	بارده اپتیک	عرض آینه (m)	طول آینه (m)	ضریب تمرکز (sun)
مقدار	3.6	5.0	2.72	0.95	0.25	1.4	16

جدول ۲. خواص ماژول فتوولتائیک خورشیدی [23]

پارامتر	نوع	بازده (%)	ضریب اصلاح دمایی بازده (1/°C)	ضریب اصلاح تابشی بازده (1/kW)	ضریب جذب (%)	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
مقدار	triple- junction	15.8	0.002	0.0074	92	167

جدول ۳. خواص سیال عامل خورشیدی.

پارامتر	نوع	بازه عملکرد (°C)	چگالی (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/m-K)	ظرفیت گرمایی (kJ/kg-K)
مقدار	DURATHERM 450	-25 to 232	844	0.141	2.2

یک چیلر جذبی تک اثره آب آمونیوم با ظرفیت خنک‌کننده و ضریب عملکرد (COP) به ترتیب ۵ کیلووات و ۰/۶۲ برای تأمین سرمایش استفاده شده است. بوده‌ن، و همکاران. این مدل چیلر را توسعه داد [۲۵]. مشخصات این چیلر در جدول ۴ و جدول ۵ ارائه شده است. اواپراتور و جاذب چیلر با فشار ۶/۲ بار و کندانسور و دی‌زابر در ۱۲/۴ بار کار می‌کنند. پمپ چیلر در دمای ۳۲ درجه سانتی‌گراد با مصرف انرژی ۵۵۰ وات کار می‌کند تا فشار محلول را از ۶/۲ به ۱۲/۴ بار افزایش دهد. سرعت جریان محلول غنی ۸۹ کیلوگرم در ساعت است.

برج خنک‌کننده ۳ تنی با ویژگی‌های شرح داده شده در جدول ۶ برای تأمین سیال خنک‌کننده برای چیلر جذبی استفاده می‌شود.

جدول ۴. پارامترهای ورودی چیلر جذبی [26]

پارامتر	سیال گرم (مولد)		سیال سرد (برج خنک کننده)		سیال سیکل سرمایش	
	Temperature (°C)	Flow rate (kg/h)	Temperature (°C)	Flow rate (kg/h)	Temperature (°C)	Flow rate (kg/h)
مقدار	95	144	30	158	14	136

جدول ۵. خواص اجزای چیلر [25]

پارامتر	اوپراتور		کندانسور		جاذب		مولد	
	دما (°C)	توان (kW)	دما (°C)	توان (kW)	دما (°C)	توان (kW)	دما (°C)	توان (kW)
مقدار	4	5	30	5	30	7.5	90	8

جدول ۶. خواص برج خنک کننده

پارامتر	توان سرمایشی (kW)	حجم هوای ورودی (CFM)	وزن عملیاتی (kg)	وزن خشک (kg)	توان (HP)
مقدار	13	870	73	28	0.17

ساختمان مورد بررسی در این تحقیق یک ساختمان مسکونی یک طبقه به مساحت ۱۱۰ مترمربع به ارتفاع ۳ متر است. یک خانواده چهارنفره در این ساختمان با سقف مسطح زندگی می کنند. دو عضو خانواده ۶ تا ۱۴ پنج روز در هفته بیرون کار می کنند. مشخصات مصالح ساختمانی ساختمان در جدول ۷ ارائه شده است. تغییر هوا در ساعت برای این ساختمان ۰/۴ در ساعت در نظر گرفته شده است و دمای آسایش برای زمستان و تابستان به ترتیب ۲۴ و ۲۶ درجه سانتیگراد است.

جدول ۷. پارامترهای اجزای ساختمان [27]

مواد	دیوار خارجی	سقف	کف
	1. پلاستر 1.27 cm	1. آسفالت 0.25 cm	1. پلاستر 1.27 cm
	2. آجر 10.16 cm	2. بتن 7.62 cm	2. بلوک سیمانی 20.32 cm
	3. پلاستر 1.27 cm	3. بلوک سیمانی 20.32 cm	3. بتن 10.16 cm
		4. پلاستر 1.27 cm	4. سرامیک 2.54 cm
U-value (W/m ² K)	3.8	1.9	0.34
وزن (kg/m ²)	385	337	340

۲-۲. ارزیابی انرژی متمرکزکننده و چیلر جذبی

با استفاده از معادله زیر، می‌توان مقدار انرژی تابشی از خورشید را که بازتابنده فرنل خطی روی گیرنده تولید می‌کند، تعیین کرد.

$$G_{PVT} = \eta_{opt} \cdot I_b \cdot IAM_{LFC} \cdot C_{LFC} \quad 1$$

بلوس و تزیوانیدیس معادلات زیر را برای محاسبه اصلاح‌کننده زاویه برخورد LFC ایجاد کردند [۲۸]

$$IAM_{LFC} = K_T(\theta_T) \cdot K_L(\theta_L) \quad 2$$

اصلاح‌کننده زاویه برخورد طولی LFC به صورت زیر است:

$$K_L(\theta_L) = -\frac{F}{L} \sqrt{1 + \left(\frac{W}{4F}\right)^2 \cdot \sin(\theta_L)} + \cos(\theta_L) \quad 3$$

اصلاح کننده زاویه برخورد خورشیدی عرضی پیشنهادی LFC عبارت است از:

$$K_T(\theta_T) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\theta_T}{2}\right) - \frac{\frac{W}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}} \sin\left(\frac{\theta_T}{2}\right) & \theta_T < \theta_{T,crit} \\ \left[\cos\left(\frac{\theta_T}{2}\right) - \frac{\frac{W}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}} \sin\left(\frac{\theta_T}{2}\right) \right] \cdot \frac{D_w}{W_0} \cdot \frac{\cos(\theta_T)}{\cos\left(\frac{\theta_T + \varphi_m}{2}\right)} & \theta_T \geq \theta_{T,crit} \end{cases} \quad ۴$$

φ_m زاویه موقعیت آینه‌های LFC:

$$\varphi_m = 2 \arctan\left(\frac{\frac{W}{4}}{F + \sqrt{F^2 + \left(\frac{W}{4}\right)^2}}\right)$$

۵

$\theta_{T,crit}$ زاویه خورشیدی عرضی بحرانی که پس از آن اثرات سایه شروع می‌شود عبارت‌اند از:

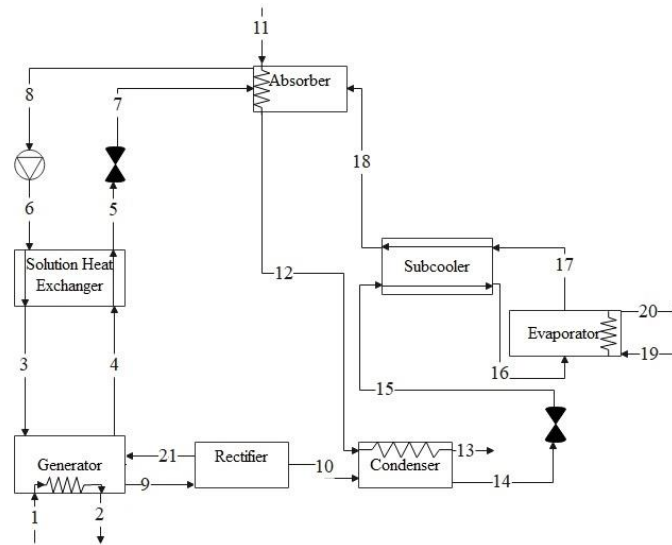
$$\theta_{T,crit} = 94.46 - 2.519 \cdot \lambda - 55.71 \cdot \lambda^2 - 0.48 \cdot \varphi_i + \frac{1.77 \varphi_i}{1000} + 1.15 \cdot \lambda \cdot \varphi_i \quad ۶$$

با استفاده از فرمول زیر می‌توان زوایای تابش عرضی و طولی را به‌عنوان تابعی از زوایای اوج و آزیموت خورشیدی بیان کرد:

$$\theta_T = \arctan(|\sin(\gamma_s)| \cdot \tan(\theta_z)) \quad ۷$$

$$\theta_L = \arctan(\cos(\gamma_s) \cdot \tan(\theta_z)) \quad ۸$$

چیلر جذبی از یک ژنراتور، جاذب، کندانسور، اواپراتور، شیرهای انبساط، پمپ، یکسوکننده و مبدل‌های حرارتی تشکیل شده است. شکل ۲ شماتیک چیلر جذبی یک اثر پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. شماتیک چیلر جذبی تک اثره

مدل‌های توسعه‌یافته توسط سیروان و همکاران و کزلکین و همکاران. برای ارزیابی چیلرهای جذبی به منظور تولید چیلر جذبی آمونیوم آب تک اثره استفاده شده است. انرژی و تعادل جرم چیلر جذبی پیشنهادی با در نظر گرفتن مخلوط دوتایی NH₃-H₂O در ادامه ارائه شده است.

بقای انرژی و جرم ژنراتور:

$$\dot{m}_{21} + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_9 \quad 9$$

$$\dot{m}_{21} \cdot X_{21} + \dot{m}_3 \cdot X_3 = \dot{m}_4 \cdot X_4 + \dot{m}_9 \cdot Y_9 \quad 10$$

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_9 \cdot h_9 - \dot{m}_{21} \cdot h_{21} - \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad 11$$

بقای انرژی و جرم مبدل حرارتی محلول:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad X_4 = X_5 \quad \dot{m}_6 = \dot{m}_3 \quad X_3 = X_6 \quad 12$$

$$\dot{Q}_{HEX} = \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad 13$$

بقای انرژی و جرم پمپ:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_6 \quad X_8 = X_6 \quad ۱۴$$

$$\dot{w}_p = \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_8 \cdot h_8 = \dot{m}_8 \cdot v_8 \cdot (P_H - P_L) \quad ۱۵$$

بقای انرژی و جرم شیر انبساط:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 \quad X_5 = X_7 \quad h_5 = h_7 \quad ۱۶$$

$$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15} \quad X_{14} = X_{15} \quad h_{14} = h_{15} \quad ۱۷$$

بقای انرژی و جرم جاذب:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 + \dot{m}_{18} \quad ۱۸$$

$$\dot{m}_8 \cdot X_8 = \dot{m}_7 \cdot X_7 + \dot{m}_{18} \cdot X_{18} \quad ۱۹$$

$$\dot{Q}_{Ab} = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_8 \cdot h_8 = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad ۲۰$$

بقای انرژی و جرم خنک کننده فرعی:

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} \quad X_{17} = X_{18} \quad \dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} \quad X_{15} = X_{16} \quad ۲۱$$

$$\dot{Q}_{subC} = \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} - \dot{m}_{17} \cdot h_{17} \quad ۲۲$$

بقای انرژی و جرم اواپراتور:

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16} \quad X_{17} = X_{16} \quad \dot{m}_{20} = \dot{m}_{19} \quad ۲۳$$

$$\dot{Q}_{EV} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17} - \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = \dot{m}_{20} (h_{19} - h_{20}) \quad ۲۴$$

بقای انرژی و جرم کندانسور:

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{14} \quad X_{10} = X_{14} \quad ۲۵$$

$$\dot{Q}_{Co} = \dot{m}_{10} \cdot h_{10} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} = \dot{m}_{10}(h_{13} - h_{12}) \quad ۲۶$$

با اتخاذ مفاهیم LMTD (اختلاف میانگین دما لگاریتمی) و UA (ضریب انتقال حرارت کلی)، هر جزء از نرخ انتقال حرارت چیلر جذبی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$EF_G = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_9} \quad ۲۷$$

$$LMTD_G = \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_9)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_9}\right)} \quad ۲۸$$

$$\dot{Q}_G = LMTD_G \cdot UA_G \quad ۲۹$$

$$LMTD_{HEX} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_6 - T_5)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_3}{T_6 - T_5}\right)} \quad ۳۰$$

$$\dot{Q}_{HEX} = LMTD_{HEX} \cdot UA_{HEX} \quad ۳۱$$

$$EF_{Ab} = \frac{T_{12} - T_{11}}{T_8 - T_{11}} \quad ۳۲$$

$$LMTD_{Ab} = \frac{(T_8 - T_{12}) - (T_7 - T_{11})}{\ln\left(\frac{T_8 - T_{12}}{T_7 - T_{11}}\right)} \quad ۳۳$$

$$\dot{Q}_{Ab} = LMTD_{Ab} \cdot UA_{Ab} \quad ۳۴$$

$$LMTD_{SubC} = \frac{(T_{17} - T_{16}) - (T_{15} - T_{18})}{\ln\left(\frac{T_{17} - T_{16}}{T_{15} - T_{18}}\right)} \quad ۳۵$$

$$\dot{Q}_{SubC} = LMTD_{SubC} \cdot UA_{SubC} \quad ۳۶$$

$$EF_{EV} = \frac{T_{19} - T_{20}}{T_{19} - T_{17}} \quad ۳۷$$

$$LMTD_{EV} = \frac{(T_{19} - T_{17}) - (T_{20} - T_{17})}{\ln\left(\frac{T_{19} - T_{17}}{T_{20} - T_{17}}\right)} \quad ۳۸$$

$$\dot{Q}_{EV} = LMTD_{EV} \cdot UA_{EV} \quad ۳۹$$

$$EF_{Co} = \frac{T_{12} - T_{13}}{T_{12} - T_{14}} \quad ۴۰$$

$$LMTD_{Co} = \frac{(T_{14} - T_{12}) - (T_{14} - T_{13})}{\ln\left(\frac{T_{14} - T_{12}}{T_{14} - T_{13}}\right)} \quad ۴۱$$

$$\dot{Q}_{Co} = LMTD_{Co} \cdot UA_{Co} \quad ۴۲$$

COP. ضریب عملکرد این چیلر جذبی:

$$COP = \frac{\dot{m}_{19}(h_{19} - h_{20})}{\dot{m}_1(h_1 - h_2)} \quad ۴۳$$

۲-۳. ارزیابی اقتصادی

جزئیات اجزای هزینه گرمایش و سرمایش سیستم خورشیدی متمرکز همراه با تأمین آب گرم و الکتریسیته در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸. هزینه‌های تجهیزات سیستم پیشنهادی

منبع	درصد هزینه (%)	هزینه (\$) (\$)	تعداد واحد مورد استفاده	هزینه واحد (\$) (\$)	قسمت
[29]	2.99%	630	1.8 m ²	350/m ²	PVT
[30]	40%	7200	36 m ²	200/m ²	LFC
[30]	9.99%	1875	1.5 m ³	1250/ m ³	TES
[30]	0.01	60	30 kg	2/ kg	سیال عامل
[30]	0.01	54	1.8 m ²	30/ m ² (collector area)	لوله ها
[31]	1	200	2	100	مبدل حرارتی
[31]	1	214	2	107	گرمایش پشتیبان
[31]	0.01	5	1	5	گرمایش پشتیبان آب مصرفی
[32]	3%	521	20 kW	$1026 \left(\frac{\dot{w}_p}{300}\right)^{0.25}$	پمپ
[32]	27%	4899	5 kW	$14740.2 \dot{Q}_{EV}^{-0.6849} + 3.3$	چیلر جذبی
-	11%	2000	1	2000	برج خنک کننده
-	2.99%	500	1	500	سیستم کنترولی
-	100	18158	-	-	کل

هنگام محاسبه کل مقدار سودی که ممکن است از یک سیستم حاصل شود، ارزش فعلی خالص، که به عنوان NPV نیز شناخته می شود، استفاده می شود، زیرا ارزش زمانی سرمایه گذاری را در نظر می گیرد. دو عامل اساسی که بر NPV تأثیر می گذارد، نرخ تنزیل و بازده پیش بینی شده است. ماهیت پیش بینی این پارامترها علت اصلی عدم قطعیت در نتایج است NPV. را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

$$NPV = -C_0 + \sum_0^{p=m-1} \frac{R_p}{(1+i)^p} \quad 44$$

نرخ بهره‌ای که ارزش فعلی خالص یک سرمایه‌گذاری معادل صفر است، به‌عنوان نرخ بازده داخلی (IRR) شناخته می‌شود. هزینه‌های فعلی خالص (NPC) و سود خالص فعلی (NPB) دو پارامتر حیاتی برای ارزیابی مالی طرح هستند.

نسبت سود به هزینه که اغلب به‌عنوان BCR شناخته می‌شود، یک شاخص عالی از وضعیت مالی فعلی سیستم است. ممکن است به‌صورت زیر بیان شود:

$$BCR = \frac{NPB}{NPC} \quad 45$$

پارامتر هزینه همسطح انرژی (LCOE) روش‌های ولید انرژی جایگزین را ارزیابی می‌کند. LCOE این پارامتر کل هزینه‌های عملیاتی برای کل تولید انرژی سیستم را به شرح زیر نشان می‌دهد:

$$LOEC = \frac{\sum_0^{p=m-1} \frac{C_t}{(1+i)^p}}{\sum_0^{p=m-1} \frac{E_t}{(1+i)^p}} \quad 46$$

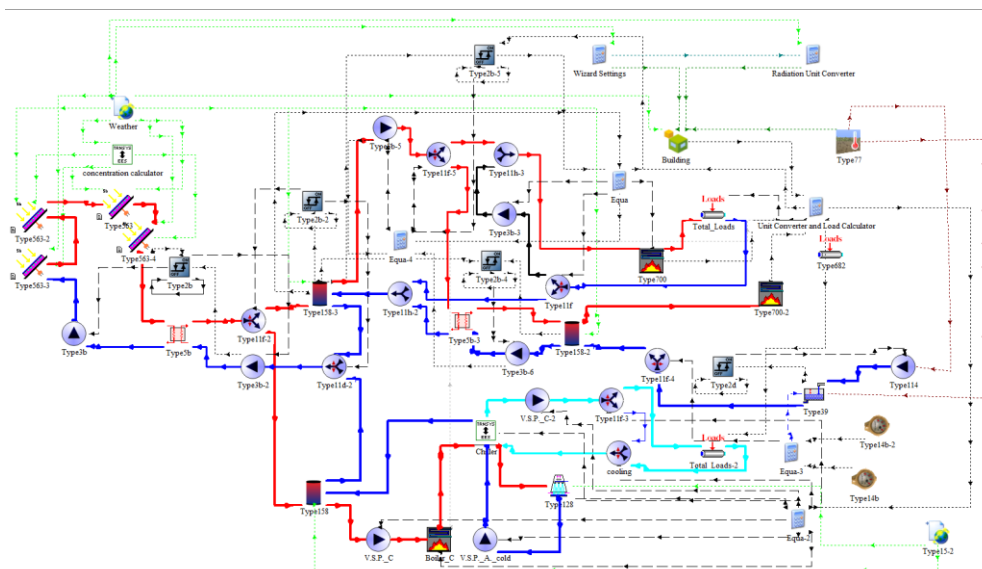
۲-۴ شبیه‌سازی

TRNSYS یک نرم‌افزار کاربردی انرژی تجدیدپذیر شناخته شده برای شرایط گذرا است که برای کاربردهای دانشگاهی و تجاری استفاده می‌شود [۳۳]. این نرم‌افزار می‌تواند از برنامه‌های کاربردی دیگری مانند حل معادلات مهندسی (EES) استفاده کند. EES یکی از بهترین برنامه‌های ارزیابی ترمودینامیکی و ریاضی است [۳۴]. استفاده از مدل ساختمان طراحی شده در نرم‌افزار SketchUp در محیط TRNSYS امکان ارزیابی انرژی ساختمان را فراهم می‌آورد.

مدل Type15-2 داده‌های آب‌وهوا را به‌عنوان شرایط اولیه سیستم فراهم می‌کند. مشخصات ورودی Type15-2 شرایط آب‌وهوا تهران است. برای مدل‌سازی LFC با استفاده از تابش پرتو خورشیدی، زاویه برخورد، زاویه اوج خورشیدی و زاویه‌های

آزیموت با استفاده از Type66a به محیط EES انتقال داده می‌شوند در این محیط توسط یک کد EES بر اساس معادله ۱ تا ۸ تابش خورشیدی متمرکز بر واحد مساحت محاسبه شده و به محیط TRNSYS بازگردانده می‌شود. پارامترهای موردنیاز معادله مورد استفاده در مشخصات LFC ارائه شده است. Type563 برای مدل سازی واحد PVT سیستم انتخاب شده است. ویژگی‌های این مدل ترکیبی از ماژول PV، روغن مصنوعی و جاذب حرارتی است. Type563 خروجی توان الکتریکی و دمای سیستم CPVT را زمانی که دمای ورودی و تشعشع را دریافت نماید محاسبه می‌نماید. Type3b برای مدل سازی پمپ‌های سیستم به کار گرفته شده است. با توجه به ماهیت گذرای چرخه‌های خورشیدی، این سیستم دارای سه TES (ذخیره‌ساز انرژی حرارتی) است. این مخازن ذخیره‌سازی ۰/۵ مترمکعب بوده و توسط Type158 مدل شده‌اند. گرمایش پشتیبان یکی دیگر از مکانیسم‌های ایمنی برای مقابله با گذرا بودن انرژی خورشیدی و تولید انرژی موردنیاز برای ساختمان هستند Type700. مدل این بخش را ارائه می‌دهد. سیستم چرخه بسته طول عمر بهتری نسبت به سیستم لوپ باز دارد. مبدل‌های حرارتی جریان معکوس سیستم پیشنهادی با مدل Type5b مدل سازی شده‌اند. یک مخزن ذخیره زیرزمینی ۱ مترمکعبی مدل Type39 برای تأمین آب خانگی انتخاب شده است.

یک کد EES بر اساس معادله ۹ تا ۴۳ برای شبیه‌سازی چیلر جذبی مورد استفاده قرار گرفته است. پارامتر ورودی برای این مدل به EES با استفاده از مدل Type66a منتقل می‌شود و شرایط خروجی بازمی‌گردد. Type128 برای برج خنک‌کننده مورد استفاده است. مدل انرژی ساختمان با استفاده از TRNBuild - Type56 شبیه‌سازی شده است. Type682 برای پیوند دادن نتیجه انرژی ساختمان به سیستم استفاده می‌شود. شکل ۳ شماتیک سیستم پیشنهادی را در TRNSYS نشان می‌دهد. ارزیابی اقتصادی سیستم ابتدا با استخراج بهره‌وری الکتریکی واحدهای PVT، سپس اتخاذ هزینه‌های سیستم و در نهایت با در نظر گرفتن انرژی حرارتی تولید شده توسط چرخه خورشیدی برای گرمایش و سرمایش انجام می‌شود. این پارامتر به یک پایه کد EES معادله‌های ۴۴ تا ۴۶ محاسبه می‌شوند.



شکل ۳. شماتیک سیستم پیشنهادی در TRNSYS

۳- بحث و نتایج

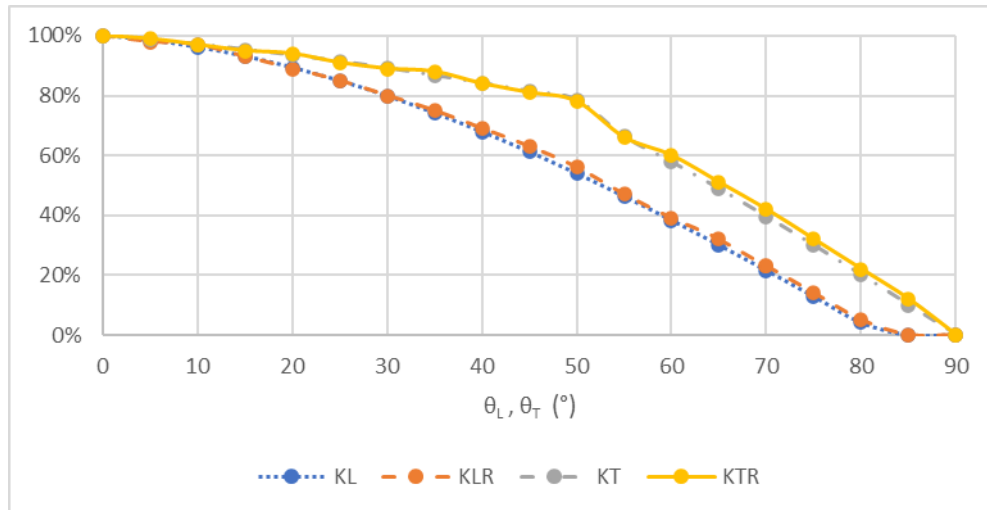
۳-۱ اعتبار سنجی

مدل‌هایی که برای توصیف شرایط سیستم استفاده می‌شوند، نیاز به اعتبارسنجی دارند. با توجه به اینکه سیستم مورد مطالعه دارای سه بخش اصلی است که نتایج مطالعات معتبر برای هر جزء آن در دسترس است، ساختار برای اعتبارسنجی به سه بخش ساختمان، LFC و تولید سه‌گانه خورشیدی دارای متمرکزکننده تقسیم می‌شود. اعتبارسنجی مدل اتخاذ شده برای ارزیابی ساختمان با استفاده از مطالعه بانسی و مارویاما [۲۹] انجام می‌پذیرد. مقایسه داده‌های مدل‌سازی حاضر با بانسی و مارویاما در جدول ۹ ارائه شده است. بیشتر اختلافات ناشی از تفاوت در داده‌های آب‌وهوایی مورد استفاده است. می‌توان از این داده‌ها نتیجه‌گیری نمود که مدل مورد استفاده با نتایج مطالعه پیشین همخوانی دارد.

جدول ۹. مدل انرژی ساختمان در مقایسه با تحقیقات بانسی و مارویاما [29]

	بار سرمایشی بیشینه (kW)	بار گرمایشی بیشینه (kW)	بار سرمایشی کل (kWh)	بار گرمایشی کل (kWh)
مقدار اعلام شده در منبع [29]	2.3	3.0	3080	6120
مقدار محاسبه شده مدل	2.4	3.1	3387.4	6362.3
اختلاف	4%	3%	9%	4%

مدل LFC به شدت به اصلاح‌کننده‌های زاویه تابش طولی و عرضی برای تولید اصلاح‌کننده زاویه برخورد متکی است. اکثر تولیدکنندگان LFC اصلاح‌کننده‌های زاویه تابش طولی و عرضی را برای محصولات خود ارائه می‌دهند. شکل ۴ مدل ارائه شده برای LFC و داده‌های سازنده ارائه شده در تحقیق فامیگلیتی و لکولونا [۲۲] را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که مدل فعلی و داده‌های مرجع با یکدیگر همخوانی دارند.



شکل ۴. اصلاح‌کننده‌های زاویه تابش عرضی و طولی این تحقیق با مقادیری که فامیگلیتی و لکولونا به دست آورده بودند مقایسه شد [22]

برای مرحله نهایی اعتبار سنجی، با جداسازی CPVT از گرمایش و سرمایش تهویه مطبوع به طور همزمان با استفاده از سلول های PV استاندارد به جای سلول های خورشیدی سه گانه، سیستم به طرح پیشنهادی معلمان و همکاران تبدیل می شود. [۲۶]. تغییر سایر پارامترهای سیستم به پارامترهای موجود در معلمان و همکاران، مقایسه ای از شبیه سازی حاضر و معلمان و همکاران. در جدول ۱۰ نشان داده شده است. نتیجه ارائه شده از این جدول نشان می دهد که مدل پیشنهادی برای چیلر جذبی و LFC تطابق خوبی با مدل اتخاذ شده در تحقیق ذکر شده قبلی دارد.

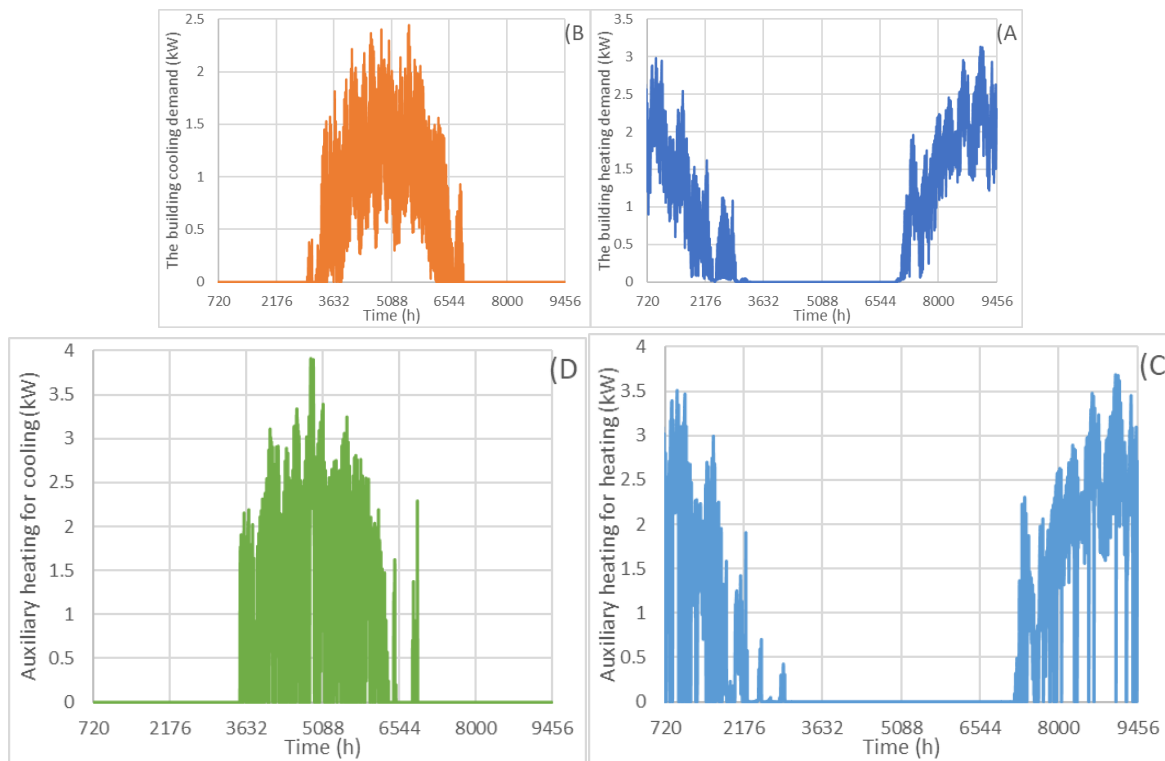
جدول ۱۰. مقایسه تولید انرژی کلی مدل پیشنهادی برای معلمان و همکاران. سیستم با داده‌های آنها [26]

	تولید انرژی الکتریکی	تولید انرژی حرارتی	سرمایش تولیدی
مقدار اعلام شده در منبع [26]	2290 (kWh)	6528 (kWh)	3944 (kWh)
مقدار محاسبه شده مدل	2423.5 (kWh)	6835.6(kWh)	4018.8 (kWh)
اختلاف	6%	4%	2%

۲-۳ عملکرد انرژی سیستم پیشنهادی

در وهله اول، برای حذف اثرات شرایط اولیه بر روی شبیه‌سازی، شبیه‌سازی به مدت ۱۳ ماه انجام می‌شود و از داده‌های ماه اول صرف‌نظر می‌شود.

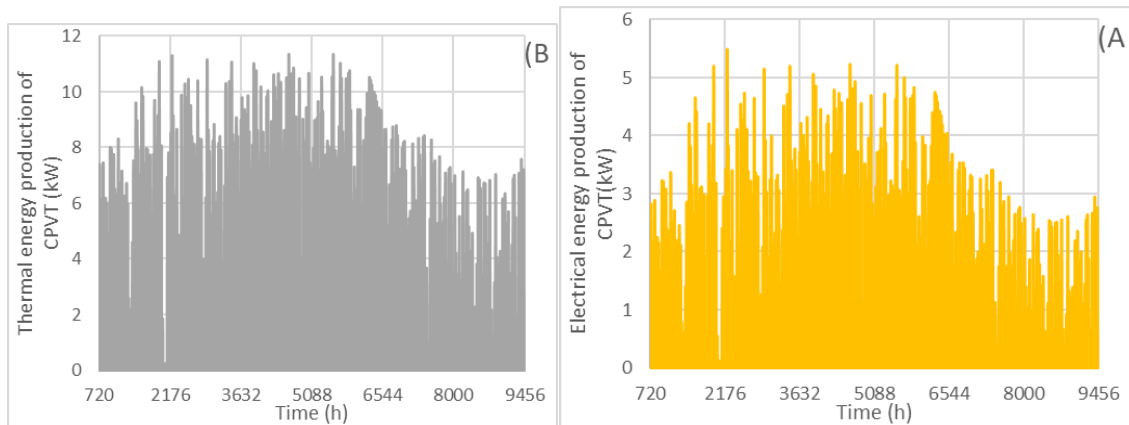
شکل ۵. A, B, C و D، به ترتیب مصرف سالانه توان سرمایشی و گرمایشی ساختمان و همچنین مصرف گرمایش پشتیبان در هر یک از شرایط را نشان می دهد. حداکثر نیاز گرمایش و سرمایش ساختمان در ساعت ۷ صبح ۱۳ ژانویه و ۹ صبح روز ۱۹ اوت به ترتیب با ۳/۱۳ و ۲/۴۴ کیلو وات رخ می دهد. بیشترین انرژی مورد نیاز ۳/۶۸ کیلووات برای سیستم پشتیبان گرمایش و ۳/۹۴ کیلووات برای سیستم پشتیبان سرمایشی به ترتیب در ساعت ۷ صبح ۱۳ ژانویه و ۱۷:۳۰ در ۲۲ جولای مورد نیاز است. راندمان دیگ بخار و احتراق به مصرف انرژی بیشتر دستگاه کمکی در مقایسه با مصرف انرژی بارهای ساختمان می انجامد. علاوه بر این، COP کمتر از یک چیلر به این مصرف انرژی بیشتر در چرخه خنک کننده می افزاید.



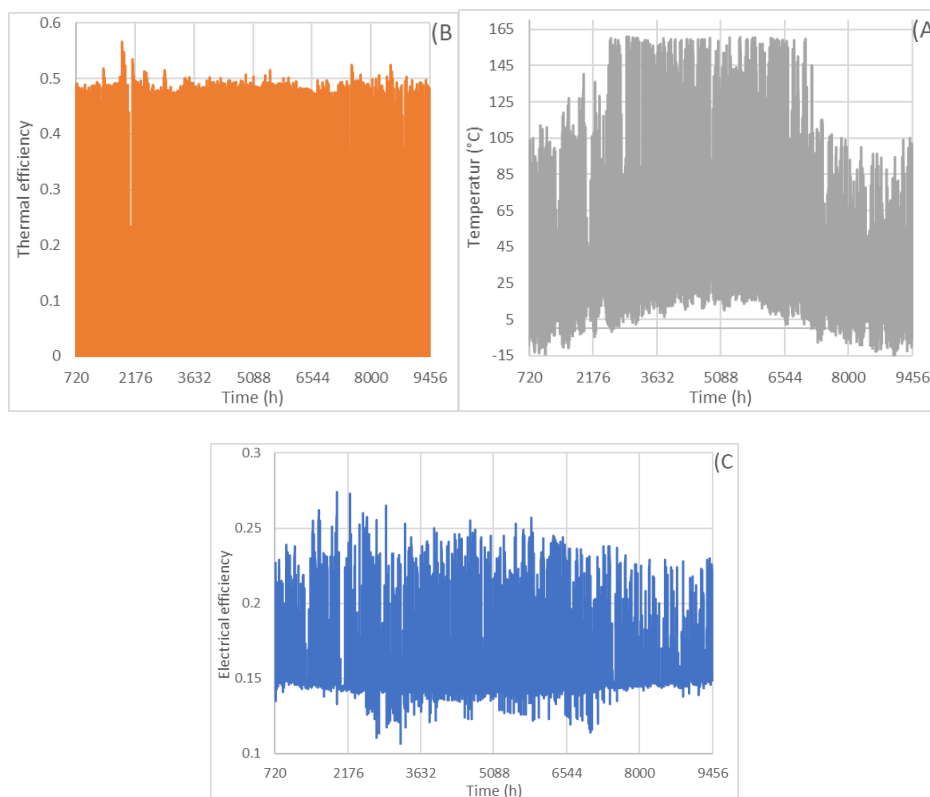
شکل ۵. نیازهای انرژی تهویه مطبوع ساختمان و گرمایش پشتیبان مورد نیاز.

شکل ۶ A و B تولید برق و انرژی حرارتی CPVT را در طول سال نشان می دهد. تولید انرژی واحد CPVT به دمای صفحه جاذب PVT و تابش پرتو بستگی دارد. دمای صفحات جاذب CPVT به طور غیرمستقیم به تابش خورشیدی وابسته است. همان طور که انتظار می رفت، حداکثر تولید انرژی الکتریکی و حرارتی سیستم در تابستان به ترتیب با ۵/۴۸ و ۱۱/۳۴ کیلووات تولید است. طرح پیشنهادی می تواند ۹۸ درصد انرژی مورد نیاز برای تولید آب گرم بهداشتی برای ساختمان را تأمین کند. بر این است که آب شهری ورودی در دمای زمین دو متر زیر زمین وارد مدار می شود. شکل ۷ A دمای خروجی سیستم CPVT را در طول یک سال نشان می دهد. سیستم کنترل ساختار پیشنهادی اگر دمای خروجی CPVT به ۱۶۰ درجه سانتیگراد برسد و انرژی بیش از حد را از بین ببرد در نتیجه، حداکثر دمای خروجی چرخه CPVT به ۱۶۰ درجه سانتیگراد محدود می شود. اگرچه طرح پیشنهادی حاضر از سرمایش غیرفعال CPVT استفاده نمی کند، نتایج دما نشان دهنده قابلیت چنین سیستمی است. شکل ۷ B و C نشان دهنده راندمان حرارتی و الکتریکی CPVT است. با افزایش تابش خورشیدی، راندمان حرارتی و الکتریکی سازه باید افزایش یابد. با این حال، افزایش دما تأثیر معکوس بر این پارامترها دارد و تأثیر رشد تابش خورشیدی را خنثی می کند.

استفاده از سلول‌های چند اتصال مستقیماً مسئول بازده الکتریکی بالای CPVT (تا ۲۸ درصد) است که انرژی خورشیدی را با کارایی بیشتری به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سیستم کنترل دمای ساختمان را در فصول سرد ۲۴ درجه سانتی‌گراد و در فصول گرم ۲۶ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کند. نفوذ تغییر هوا به ساختمان ۰/۴ در ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. تولید انرژی الکتریکی و حرارتی در تمام طول سال از طریق سیستم CPVT



شکل ۷. دمای خروجی، بازده حرارتی و الکتریکی CPVT در طول یک سال

یک ارزیابی مقایسه‌ای از روش‌های مختلف برای تأمین انرژی برای برآورد نیاز انرژی ساختمان در جدول ۱۱ ارائه شده است. در این جدول، همه سیستم‌ها، به‌استثنای دو CPVT موازی با سلول‌های خورشیدی سه‌لایه، دارای مساحت کلکتور یکسانی هستند. PVT با ساختار سلول خورشیدی استاندارد به‌عنوان مرجع برای ارزیابی انرژی تولیدی ساختار دیگر استفاده است. استفاده از این ساختار انرژی موردنیاز برای گرمایش آب را تا ۷۱ درصد کاهش می‌دهد PVT. با سلول‌های خورشیدی سه‌لایه ۱٪ انرژی بیشتر برای گرم کردن آب نیاز دارد و ۱۲٪ انرژی الکتریکی بیشتری نسبت به سیستم خورشیدی استاندارد تولید می‌کند. با این حال، یک کلکتور حرارتی متمرکز تولید انرژی الکتریکی ندارد اما ۴۱۸ درصد انرژی حرارتی بیشتری تولید می‌کند CPVT. با سلول‌های خورشیدی معمولی ۳۸۴٪ انرژی حرارتی بیشتری را به دلیل سازگاری واحد متمرکز و ۳۲٪ انرژی الکتریکی کمتر از سیستم استاندارد ارائه می‌دهد. این کاهش تولید الکتریکی عمدتاً به دلیل افزایش دمای سلول در این سیستم است GPVT. با سلول‌های خورشیدی سه‌لایه با اجرای سلول‌هایی با وابستگی کمتر به دما از این اثر منفی جلوگیری می‌کند. این سازه ۲۵ درصد و ۳۶۶ درصد تولید انرژی الکتریکی و حرارتی بالاتری دارد. با ترکیب دو GPVT با سلول‌های خورشیدی سه‌گانه در یک سیستم موازی، ۱۱۴٪ و ۵۵۵٪ انرژی الکتریکی و حرارتی بیشتر از حالت استاندارد می‌توان به دست آورد.

جدول ۱۱. انواع مختلف عملکرد واحد خورشیدی اتخاذ شده در سیستم پیشنهادی

	گرمایش پشتیبان موردنیاز برای گرمایش محیط (kWh)	گرمایش پشتیبان موردنیاز برای گرمایش آب بهداشتی (kWh)	گرمایش پشتیبان موردنیاز برای سیکل سرمایش (kWh)	انرژی الکتریکی تولیدی (kWh)	انرژی حرارتی تولیدی (kWh)
بدون سیکل خورشیدی	7484.96	3235.66	7277.32	0	0
PVT با سلول‌های استاندارد	7484.96	950.10	7269.52	4476.71	3100.81
PVT با سلول‌های سه‌لایه	7484.96	955.58	7269.53	5036.08	3065.68
کلکتور حرارتی متمرکز	5627.07	2866.26	8.86	0	16054.39
کلکتور حرارتی متمرکز با	6006.78	3121.03	13.65	3052.21	15011.35

سلول‌های استاندارد					
کلکتور حرارتی متحرک با سلول‌های سه‌لایه	6018.80	3377.65	13.37	5585.84	14437.60
دو کلکتور حرارتی متحرک با سلول‌های سه‌لایه موازی	4391.06	199.09	4.01	9578.08	20318.16

۳-۳ عملکرد اقتصادی سیستم پیشنهادی

مفروضات اصلی عبارتند از نرخ بهره ۵٪، طول عمر ۲۲ سال سیستم، $0.216 \text{ kWh}/\text{\$}$ تعرفه خوراک، $0.33 \text{ m}^3/\text{\$}$ قیمت CNG و ۰٪ مالیات [۱۷]. عوامل اقتصادی برای سازه‌های مختلف کلکتور خورشیدی در جدول ۱۲ ارائه شده است. با قوانین فعلی دولت در مورد انرژی، CPVT با سلول‌های خورشیدی سه‌لایه بهترین عملکرد اقتصادی را دارد. همه کلکتورها تا حدودی توجیه اقتصادی دارند به جز کلکتورهای حرارتی متمرکز. هزینه کم CNG مهمترین عاملی است که به طور قابل توجهی بر توجیه اقتصادی این سیستم تأثیر می‌گذارد. بیشتر درآمد چرخه خورشیدی از تولید برق ناشی می‌شود.

جدول ۱۲. پارامترهای اقتصادی برای کلکتورهای خورشیدی مختلف مورد استفاده در سیستم.

	NPC (\$)	هزینه تعمیر و نگاه‌داری (\$)	NPV (\$)	PBT (year)	BCR	IRR (%)	LCOE (\$/kWh)
CPVT با سلول‌های استاندارد	10626	106.26	8953.54	11.03	84%	7%	0.025
CPVT با سلول‌های سه‌لایه	16936	84.68	5509.13	15.33	33%	3%	0.028

کلکتور حرارتی متمرکز	10410	208.2	-3873.40	-	-37%	-3%	0.018
کلکتور حرارتی متمرکز با سلول‌های استاندارد	10626	318.78	6363.57	12.71	60%	5%	0.022
کلکتور حرارتی متمرکز با سلول‌هایی سه لایه	11040	276	17557.71	7.84	159%	12%	0.018
دو کلکتور حرارتی متمرکز با سلول‌های سه لایه موازی	19040	476	26964.17	8.41	142%	11%	0.021

۴- نتیجه گیری

یک سیستم تولید چندگانه خورشیدی در مطالعه حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم پیشنهادی متشکل از کلکتورهای حرارتی فتوولتائیک متمرکز است که علاوه بر تولید انرژی الکتریکی برای فروش به شبکه، تا حدی انرژی حرارتی واحد تهویه مطبوع و آب گرم را تأمین می‌کند. سیستم متمرکزکننده پیشنهادی برای کلکتورها یک بازتابنده فرنل خطی است که سلول‌های خورشیدی با اتصال سه لایه را در خود جای داده است. این سیستم دارای گرمایش پشتیبان گازسوز است. این سیستم مستقیماً از انرژی حرارتی برای تأمین نیاز گرمایشی ساختمان استفاده می‌کند و به منظور تأمین سرمایه‌های لازم ساختمان، چیلر جذب آب آمونیوم تک اثر را مورد استفاده قرار می‌دهد. مدل‌های ریاضی برای LFC و چیلر جذبی در EES کدنویسی شده‌اند. این سیستم با ترکیب یک ساختمان مسکونی واقع در غرب تهران، ایران، در TRNSYS شبیه‌سازی شده است. اعتبارسنجی مدل سیستم در مقایسه با مطالعات قبلی انجام شده است. در نهایت، اقتصاد سیستم و عملکرد انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج این مطالعه را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- CPVT پیشنهادی دارای سلول‌های خورشیدی سه لایه دارای میانگین بازده حرارتی ۴۸ درصد و بازده الکتریکی ۲۳ درصد است.
- کل تولید انرژی ساختار پیشنهادی به ترتیب ۱۰٪، ۲۰٪، ۶۰٪ و ۶۲٪ بیشتر از CPVT با سلول‌های خورشیدی استاندارد، کلکتور حرارتی متمرکز، PVT با سلول‌های بسیار کارآمد، و PVT با سلول‌های خورشیدی سنتی است.
- CPVT پیشنهادی برای سیستم، انرژی مورد نیاز ساختمان را تا ۴۸٪ کاهش می‌دهد. در مقابل، CPVT با سلول‌های

ای خورشیدی استاندارد، کلکتورهای حرارتی متمرکز، سلول‌های PVT بسیار کارآمد و PVT با سلول‌های خورشیدی سنتی این نیازها را به ترتیب ۴۹، ۵۳، ۱۳ و ۱۳ درصد کاهش می‌دهند. اینها بدون توجه به تولید الکتریکی ه ر سیستم هستند.

- استفاده از دو مورد CPVT پیشنهادی که به طور موازی به سیستم متصل می‌شوند، ۷۴ درصد از نیازهای انرژی سیستم را مرتفع می‌سازد.
- CPVT پیشنهادی دارای NPC، NPV، PBT، BCR، IRR، و LCOE به ترتیب ۱۱۰۴۰، ۱۷۵۵۷، ۷/۸۴، ۱۵۹، ۱۲٪ و ۰/۰۱۸ است. این داده‌های اقتصادی نشان‌دهنده جذابیت اقتصادی کم تا متوسط سیستم است.
- بیشترین تأثیر منفی بر کارایی اقتصادی سیستم، هزینه کم CNG است، زیرا یک کلکتور حرارتی متمرکز دارای ۳ IRR % و NPV-۳۸۷۳/۴۰ است که شاخص‌های ضرر سرمایه‌گذاری هستند.

فهرست علائم و اختصارات

BCR	نسبت هزینه به سرمایه	T	دما (°C)
C ₀	هزینه اولیه (\$)	t	تعداد دوره
C _{LFC}	LFC ضریب تمرکز	TES	ذخیره انرژی حرارتی
COP	ضریب عملکرد چیلر جذبی	UA	ضریب انتقال حرارت کلی (kW/°C)
D _w	LFC فاصله بازتابنده‌های	v	حجم ویژه محلول (m ³ /kg)
EF	بازده	W	LFC فاصله مرکز و آخرین آینه (m)
F	فاصله کانوئی (m)	W ₀	عرض هر آینه LFC (m)
G _{PVT}	(W) تابشی	w _p	کار پمپ (kW)
h	آنتالپی خاص (kJ/kg)	X	غلظت محلول مایع
i	نرخ بهره	Y	غلظت محلول بخار
IAM _{LFC}	LFC اصلاح‌کننده زاویه تابش	نمادهای یونانی	
I _b	تابش مستقیم (W/m ²)	γ _s	(°) زاویه آزیموت خورشیدی
IRR	(%) نرخ بازده داخلی	η _{opt}	بازده نوری
LCOE	هزینه همسطح انرژی	θ _L	(°) زاویه برخورد طولی
LMTD	(°C) اختلاف دمای میانگین لگاریتمی	θ _T	(°) زاویه برخورد عرضی
IRR	نرخ بازده داخلی	θ _Z	(°) زاویه اوج خورشیدی
K _L	LFC اصلاح‌کننده زاویه برخورد طولی	λ	LFC نسبت عرض به فاصله آینه
K _T	LFC اصلاح‌کننده زاویه برخورد خورشیدی عرضی	φ _m	(°) LFC زاویه موقعیت آینه‌های
L	LFC طول (m)	زیرنویس	
LCOE	هزینه یکسان‌سازی انرژی (\$/kWh)	Ab	جاذب
m ⁱ	نرخ جریان جرمی (kg/h)	Co	کندانسور
NPB	سود خالص فعلی (\$)	EV	اوپراتور
NPC	هزینه‌های فعلی خالص (\$)	G	ژنراتور
NPV	ارزش خالص فعلی (\$)	H	بالا
P	فشار (kPa)	HEX	مبدل حرارتی
PBT	زمان بازگشت سرمایه (year)	L	پایین
Q	نرخ انتقال حرارت (kW)	subC	فرعی
R _t	جریان نقدی خالص t دوره (\$)		

مراجع:

1. Wrigley EA. Energy and the English Industrial Revolution. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2013;371(1986):20110568.
2. Adams WG, Day RE. V. The action of light on selenium. Proceedings of the Royal Society of London. 1877;25(171-178):113-7.
3. Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lacis A, Oinas V. Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2000;97(18):9875-80.
4. Dokhaee, E., Saraei, A., Jafari Mehrabadi, S. et al. Simulation of the Allam cycle with carbon dioxide working fluid and comparison with Brayton cycle. Int J Energy Environ Eng 12, 543–550 (2021).
5. Nazarzadehfard, A., Saraei, A., Jafari Mehrabadi, S. et al. Exergy and thermoeconomic analysis of the combined MED desalination system and the Allam power generation system. Int J Energy Environ Eng 12, 679–687 (2021).

- 6.A. Ahmadi, A. R. Noorpoor, A. R. Kani and A. Saraei. Modeling and Economic Analysis of MED-TVC Desalination with Allam Power Plant Cycle in Kish Island. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE) 2021 Vol. 40 Issue 6 Pages 1882-1892.
- 7.Thirugnanasambandam M, Iniyar S, Goic R. A review of solar thermal technologies. Renewable and sustainable energy reviews. 2010;14(1):312-22.
- 8.Quaschnig V, Muriel MB. Solar power-photovoltaics or solar thermal power plants? VGB POWERTECH-INTERNATIONAL EDITION-. 2002;82:48-52.
- 9.Tselepis S, Tripanagnostopoulos Y, editors. Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. Proceedings of the international conference PV in Europe; 2002.
10. Huang BJ, Lin TH, Hung WC, Sun FS. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. Solar Energy. 2001;70(5):443-8.
11. Coventry JS. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. Solar Energy. 2005;78(2):211-22.
12. Theristis M, Fernández EF, Stark C, O'Donovan TS. A theoretical analysis of the impact of atmospheric parameters on the spectral, electrical and thermal performance of a concentrating III-V triple-junction solar cell. Energy Conversion and Management. 2016;117:218-27.
13. Mittelman G, Kribus A, Dayan A. Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. Energy Conversion and Management. 2007;48(9):2481-90.
14. Mittelman G, Kribus A, Mouchtar O, Dayan A. Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. Solar Energy. 2009;83(8):1322-34.
15. Buonomano A, Calise F, Palombo A. Solar heating and cooling systems by CPVT and ET solar collectors: A novel transient simulation model. Applied Energy. 2013;103:588-606.
16. Horvat I, Grubišić D, Marušić A, Lončar D. Operation Strategies of a Solar Trigeneration Plant in a Residential Building. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2021;9(2):1-13.
17. Deymi-Dashtebayaz M, Rezapour M, Farahnak M. Modeling of a novel nanofluid-based concentrated photovoltaic thermal system coupled with a heat pump cycle (CPVT-HP). Applied Thermal Engineering. 2022;201:117765.
18. Calise F, Cappiello FL, Dentice d'Accadia M, Vicidomini M. Thermo-economic optimization of a novel hybrid renewable trigeneration plant. Renewable Energy. 2021;175:532-49.
19. Leonforte F, Miglioli A, Del Pero C, Aste N, Cristiani N, Croci L, et al. Design and performance monitoring of a novel photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump system for residential applications. Applied Thermal Engineering. 2022;210:118304.
20. Chen Y, Hu X, Xu W, Xu Q, Wang J, Lund PD. Multi-objective optimization of a solar-driven trigeneration system considering power-to-heat storage and carbon tax. Energy. 2022;250:123756.

21. Khademy, M., Saraei, A. & Abyaneh, M.H.J. Application of trigeneration system power by concentrating photovoltaic-thermal solar collectors for energy demands of an industrial complex. *Int J Energy Environ Eng* 13, 1101–1128 (2022).
22. Famiglietti A, Lecuona A. Small-scale linear Fresnel collector using air as heat transfer fluid: Experimental characterization. *Renewable Energy*. 2021;176:459-74.
23. Helmers H, Kramer K. Multi-linear performance model for hybrid (C)PVT solar collectors. *Solar Energy*. 2013;92:313-
24. Fantucci S, Lorenzati A, Kazas G, Levchenko D, Serale G. Thermal Energy Storage with Super Insulating Materials: A Parametrical Analysis. *Energy Procedia*. 2015;78:441-6.
25. Boudéhenn F, Demasles H, Wytttenbach J, Jobard X, Chèze D, Papillon P. Development of a 5 kW cooling capacity ammonia-water absorption chiller for solar cooling applications. *Energy Procedia*. 2012;30:35-43.
26. Moaleman A, Kasaeian A, Aramesh M, Mahian O, Sahota L, Nath Tiwari G. Simulation of the performance of a solar concentrating photovoltaic-thermal collector, applied in a combined cooling heating and power generation system. *Energy Conversion and Management*. 2018;160:191-208.
27. Baneshi M, Maruyama S. The impacts of applying typical and aesthetically–thermally optimized TiO₂ pigmented coatings on cooling and heating load demands of a typical residential building in various climates of Iran. *Energy and Buildings*. 2016;113:99-111.
28. Bellos E, Tzivanidis C. Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector. *Solar Energy*. 2018;173:769-79.
29. Matuska T. Performance and economic analysis of hybrid PVT collectors in solar DHW system. *Energy Procedia*. 2014;48:150-6.
30. Cocco D, Cau G. Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2015;229(6):677-88.
31. Ala G, Orioli A, Di Gangi A. Energy and economic analysis of air-to-air heat pumps as an alternative to domestic gas boiler heating systems in the South of Italy. *Energy*. 2019;173:59-74.
32. Ehyaei MA, Ahmadi A, El Haj Assad M, Rosen MA. Investigation of an integrated system combining an Organic Rankine Cycle and absorption chiller driven by geothermal energy: Energy, exergy, and economic analyses and optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2020;258:120780.
33. Wei D, Zhang L, Alotaibi AA, Fang J, Alshahri AH, Almitani KH. Transient simulation and comparative assessment of a hydrogen production and storage system with solar and wind energy using TRNSYS. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022.
34. Kichou S, Markvart T, Wolf P, Silvestre S, Chouder A. A simple and effective methodology for sizing electrical energy storage (EES) systems based on energy balance. *Journal of Energy Storage*. 2022;49:104085.