



Evaluation of the Performance of a Combined Heat Pump System with a Photovoltaic Collector Integrated with a Roof for a Zero-Energy Building in Tehran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Asadi A.^{1*},
Jafarkazemi F.²,
Jalaleddin Abyaneh MH.²

How to cite this article

Asadi A, Jafarkazemi F, Jalaleddin Abyaneh MH, Evaluation of the Performance of a Combined Heat Pump System with a Photovoltaic Collector Integrated with a Roof For a Zero-Energy Building in Tehran. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(12):715-726.

¹ Mechanical Engineering Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Research Centre for Modelling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
st_ar_asadi@azad.ac.ir

Article History

Received: April 18, 2022
Accepted: July 26, 2022
ePublished: December 13, 2022

ABSTRACT

The concept of Zero Energy Building has been introduced globally to reduce energy consumption and carbon emissions in the building sector. Renewable energy systems such as Solar Thermal collectors, Photovoltaic collectors, and Heat Pumps are used to implement ZEBs. This study proposes a Building Integrated Photovoltaic Thermal-Air Source Heat Pump (BIPVT-ASHP) to realize ZEB in a small-scale building. To evaluate the performance of the system, a BIPVT-ASHP hybrid system model was designed, and also the building load model was defined based on the actual building conditions. Then, the heating and cooling performance of the BIPVT-ASHP system was dynamically simulated for one year using TRNSYS software. Then the system was numerically evaluated from energy, economic and environmental perspectives. According to the results of this study, for this system, the initial non-renewable energy consumption was 1.29 kWh/m² per year, which was less than the heating energy threshold for the ZEB, and the proposed system met well the ZEB conditions. In addition, it was shown that for a given area, photovoltaic/thermal technology leads to a further reduction in non-renewable primary energy consumption but less solar thermal energy production compared to traditional separate production using photovoltaic collectors.

Keywords Solar Energy, ZEB, Heat Pump, Photovoltaic-Thermal Collector.

CITATION LINKS

1- Photovoltaic-Thermal Solar-Assisted... 2- Energy and Exergy Analysis of a Photovoltaic... 3- Performance Analysis of Integrated... 4- TRNSYS 18: A Transient System... 5- Principles for Nearly Zero-Energy... 6- ENERGY I, AGENCY... 7- A Review on Buildings... 8- Counting the Costs of Comfort... 9- IEA. Net Zero by 2050... 10- IEA. Heat Pumps... 11- The possibilities of... 12- Energy Use and Retrofitting... 13- A Multistage Heat... 14- Investigation of the Efficiency... 15- Solar Engineering of Thermal... 16- Developing a Tri-Generation... 17- Energy Analysis of a Thermal... 18- Techno-Economic Analysis of Hybrid... 19- Photovoltaic Thermal Module... 20- The Performance Comparison... 21- Energy and Exergy Analysis... 22- Exergetic Advancement ... 23- Exergy and Economic Evaluation... 24- Photovoltaic/Thermal (PV/T) ... 25- Energetic and Financial... 26- Energy and Exergy Analyses... 27- Design, Fabrication and Experimental... 28- Building-Integrated Photovoltaics... 29- Geothermal Heat Pump ... 30- IDA ICE: The Simulation... 31- Simulation Study on the Thermal... 32- Drying Kinetics and... 33- Experimental Investigation ... 34- Dynamic Modeling of Air... 35- Comparison of BIPV and BIPVT... 36- Cost-Benefit Analysis of Hybrid ... 37- Economic Feasibility and Technical ... 38- A Review of Designs... 39- Perspectives and Review of... 40- Fossil CO₂ Emissions... 41- TRNSYS 18: A Transient... 42- Meteorism [Internet]. 2021... 43- TESS T. TESS COMPONENT... 44- Energy and Exergy Analysis... 45- A Systematic Review of... 46- Advanced Photovoltaic... 47- Energy, Exergy and Economic... 48- Energy IsMo. Electricity tariff 2021... 49- Oil Mo. MOP-HSED-GL-307 2021... 50- Simulation and Model Validation...

بررسی عملکرد سیستم ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف برای ساختمان انرژی صفر در تهران

علیرضا اسدی^{۱*}، فرزاد جعفر کاظمی^۲، محمد حسن جلال الدین ایبانه^۲

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران.

^۲مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

مفهوم ساختمان انرژی صفر [1] برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن در سطح جهانی و در بخش ساختمان معرفی شده است. برای اجرای ساختمان های انرژی صفر از سیستم های انرژی تجدیدپذیر مانند کلکتور حرارتی خورشیدی، کلکتور فتوولتائیک [2] و سیستم های پمپ حرارتی منبع هوا [3] استفاده می شود. این مطالعه یک سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان (Building Integrated Photovoltaic Thermal-Air Source Heat Pump) را برای تحقق ساختمان انرژی صفر در مقیاس کوچک پیشنهاد می کند. در این مقاله به منظور ارزیابی کارکرد سیستم، یک مدل سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف ساختمان طراحی شده و مدل بار ساختمان نیز بر اساس شرایط واقعی ساختمان تعریف شد. سپس عملکرد گرمایشی و سرمایشی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف ساختمان به مدت یک سال با استفاده از نرم افزار TRNSYS [4] شبیه سازی دینامیکی شد و سیستم برای کاربردهای مختلف از دیدگاه های انرژی، اقتصادی و زیست محیطی به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای این سیستم مصرف انرژی تجدیدناپذیر اولیه ۹/۱۹ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال می باشد. با توجه به اینکه این مقدار کمتر از مقدار آستانه انرژی گرمایشی برای ساختمان انرژی صفر بود، لذا سیستم پیشنهادی شرایط ساختمان انرژی صفر را به خوبی برآورده کرد. بعلاوه نشان داده شد که برای یک منطقه مشخص، با اینکه فناوری فتوولتائیک حرارتی منجر به کاهش مصرف انرژی اولیه تجدیدناپذیر می شود ولی انرژی خورشیدی تولیدی توسط آن از انرژی تولیدی توسط کلکتورهای فتوولتائیک کمتر است.

کلیدواژه ها: انرژی خورشیدی، ساختمان انرژی صفر، پمپ حرارتی، کلکتور فتوولتائیک-حرارتی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۴

*نویسنده مسئول: st_ar_asadi@azad.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش رشد جمعیت، همراه با بالا رفتن استانداردهای زندگی و آسایش انسان همراه با افزایش زمان حضور در داخل ساختمان ها، مصرف انرژی در بخش ساختمان را به طور چشمگیری افزایش داده است و این روند صعودی تقاضای انرژی، نگرانی هایی را در مورد مشکلات فرسودگی منابع انرژی و اثرات زیست محیطی سنگین (کاهش ضخامت لایه اوزون، گرم شدن کره زمین، تغییرات آب و هوا و غیره) ایجاد کرده است. به همین دلیل امروزه بهره وری

انرژی در ساختمان ها یکی از اهداف اصلی سیاست انرژی در سطوح ملی، منطقه ای و بین المللی است [5]. بخش عمده ای از انرژی در ساختمان صرف تامین نیازهای سرمایشی و گرمایشی می شود. سهم جهانی ساختمان ها در مصرف انرژی، اعم از مسکونی و تجاری، به طور پیوسته افزایش یافته و در کشورهای توسعه یافته به ۴۰ درصد رسیده و از سایر بخش های اصلی مانند صنعتی و حمل و نقل، فراتر رفته است [6]. در این میان رشد استفاده از انرژی سیستم های سرمایشی و گرمایشی (HVAC) که حدود ۵۰ درصد مصرف ساختمان و ۲۰ درصد از کل مصرف در ایالات متحده می باشد نیز کاملاً مشهود است [7]. همچنین طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی، ساختمان ها حدود ۳۰ درصد از کل انرژی جهان را مصرف می کنند، از این رو کاهش مصرف انرژی ساختمان ها به یک ضرورت فوری تبدیل شده است [8]. به دلیل این روند جهانی، سیاست ساختمان های انرژی صفر (ZEB) از بخش عمومی به بخش خصوصی تغییر کرده است [9]. برای اجرای ساختمان انرژی صفر، سیستم های تهویه مطبوع گرمایش و سرمایش با راندمان بالا مبتنی بر پمپ های حرارتی همراه با سیستم های انرژی های تجدیدپذیر معرفی شده اند. در ایالات متحده، پمپ های حرارتی در بیش از ۴۰ درصد از خانه های جدید یک خانواده ای، و تقریباً ۵۰ درصد از ساختمان های چند خانواده ای نصب شده اند [10]. پمپ های حرارتی غالباً نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی برای تامین گرمایش دارند [11]. پمپ های حرارتی با بازیابی گرمای تلف شده در دمای پایین می توانند مصرف انرژی فسیلی را تا حد زیادی کاهش دهند، لذا در صرفه جویی انرژی و سازگاری با محیط زیست اهمیت زیادی دارند [12]. مشکل اصلی پمپ های حرارتی کاهش ضریب عملکرد آنها در اثر کاهش دمای منبع انرژی است که با استفاده از پمپ های حرارتی چند مرحله ای [13] و استفاده از مبردهای زئوتروپیک [14] جهت رفع این مشکل اقدام شده است. استفاده از کلکتور فتوولتائیک حرارتی بعنوان منبع انرژی پمپ حرارتی این مزیت را دارد که علاوه بر افزایش دمای منبع انرژی پمپ حرارتی باعث کاهش دمای کلکتور و در نتیجه افزایش راندمان الکتریکی آن می شود [15]. سیستم های ترکیبی مانند سیستم های گرمایشی تولید همزمان با کمک خورشید برای ساختمان های مسکونی [16] راه حل های موثر و مهمی برای کاهش گرمایش جهانی هستند. امروزه از کلکتور فتوولتائیک حرارتی و پمپ حرارتی برای برآوردن نیاز انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی استفاده می شود و سیستم هایی که هر دو به صورت یکپارچه در آنها استفاده می شوند بیش از سایر سیستم های سنتی مورد توجه قرار می گیرند و به همین دلیل بسیاری از محققان بر روی این سیستم ها متمرکز شده اند. کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی نسبت به کلکتورهای فتوولتائیک معمولی کارآمدتر هستند و به راحتی می توان آنها را با فناوری های گرمایش و سرمایش معمولی ادغام کرد.

از نظر اقتصادی نیز قابل اجرا بود. کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی به دلیل افزایش جریان جرمی سیال مورد استفاده، خنک‌سازی بهتری انجام می‌دهند و بازده الکتریکی و اگزرژی الکتریکی را افزایش می‌دهند [24]. بلاس [25] چهار سیستم مختلف پمپ حرارتی را با کمک نرم‌افزار ترنسیس از نظر انرژی و اقتصادی ارزیابی کرد و گزارش داد که استفاده از کلکتور فتوولتائیک و پمپ حرارتی هوایی بهترین انتخاب از نظر اقتصادی و استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی در ترکیب با پمپ حرارتی با منبع آب بهترین انتخاب از جهت بازده کل سیستم می‌باشد.

سیستم‌های مبتنی بر کلکتور فتوولتائیک حرارتی مصرف برق شبکه کمتری نسبت به سیستم‌های مشابه استفاده می‌کنند و به همین دلیل، این سیستم فناوری سبتری را ارائه می‌کند. تجزیه و تحلیل انرژی و اگزرژی سیستم پمپ حرارتی خورشیدی مورد استفاده برای گرمایش صنعتی به طور جامع توسط سولمن و همکاران [26] مورد بحث قرار گرفت. در حالی که راندمان اگزرژتیک پمپ حرارتی و سیستم به ترتیب ۴۲/۵ درصد و ۳۵/۷ درصد بود، مقادیر ضریب عملکرد (COP) انرژی آنها ۳/۵۴ و ۲/۹۷ محاسبه شد. یک سیستم پمپ حرارتی با پشتیبانی از یک چرخه جدید فتوولتائیک (PV/LHP) توسط ژانگ و همکاران [27] برای رفع نیاز به برق و آب گرم طراحی و ساخته شد. در نتیجه مطالعه آنها، ضریب عملکرد حرارتی پایه سیستم (COP_{th}) معادل ۵/۵۱ و ضریب عملکرد سیستم فتوولتائیک حرارتی (COP_{PPV/T}) معادل ۸/۷۱ محاسبه شد. بازده کلی انرژی و اگزرژی سیستم به ترتیب تقریباً ۴۸ درصد و ۱۵ درصد بود. کارایی سیستم طراحی شده ۳ تا ۵ درصد بیشتر از راندمان سیستم‌های سنتی و ۷ درصد بیشتر از بازده سیستم استاندارد کلکتور فتوولتائیک محاسبه شد. همچنین ضریب عملکرد بین ۱/۵ درصد تا ۴ درصد بیشتر از سیستم‌های گرمایش خورشیدی هوا-آب محاسبه شد.

در یک ارزیابی اقتصادی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان توسط آزمایشگاه انرژی بازیافت‌پذیر ملی ایالات متحده آمریکا (U.S.NREL)، چالش‌های تکنیکی قابل توجه برای کاربری عمومی این سیستم، قبل از اینکه هزینه‌های نصب آن با هزینه‌های کلکتور فتوولتائیک، رقابتی شود مورد توجه قرار گرفت [28]. با این وجود، این اتفاق نظر وجود داشت که از طریق تجاری‌سازی گسترده، سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان به ستون فقرات ساختمان‌های انرژی صفر و هدف اروپا برای سال ۲۰۲۰ تبدیل می‌شود. علی‌رغم این نوید تکنیکی، موانع اجتماعی برای کاربرد گسترده آن، مثلاً فرهنگ محافظه‌کارانه صنعت ساختمان و ترکیب آن با طرح‌های شهری پرتراکم شناسایی شده است. این موارد نشان می‌دهند که قابل استفاده بودن سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان برای طولانی مدت،

عملکرد انرژی یک سیستم گرمایش فضا با سیستم ترکیبی پمپ حرارتی و کلکتور فتوولتائیک حرارتی توسط والاتی و همکاران برای رم، میلان و کراکوف مورد بررسی قرار گرفت [17]. آگیلار-جیمینز و همکاران [18] یک تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی با نرم‌افزار ترنسیس برای کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی هیبریدی انجام دادند. این سیستم در چهار شهر با شرایط آب و هوایی متفاوت تست شد و نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که سیستم‌های ترکیبی با کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی عملکرد بالاتری نسبت به سیستم‌های معمولی دارند.

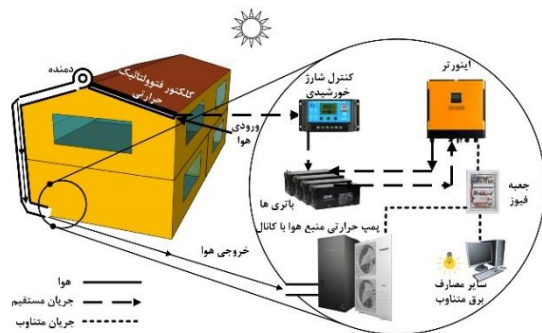
محبوبیت روزافزون کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی در سال‌های اخیر محققان را به انجام تحلیل‌های انرژی، اگزرژی و اقتصادی در استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی همراه با سیستم‌هایی مانند پمپ‌های حرارتی به دلیل تولید ترکیبی برق و انرژی حرارتی در کاربردهای انرژی خورشیدی سوق داده است. هنگامی که تجزیه و تحلیل انرژی برای ارزیابی عملکرد یک سیستم انرژی انجام می‌شود، تجزیه و تحلیل اگزرژی در ارزیابی کیفیت انرژی تولید شده اهمیت بیشتری دارد. افزایش بازده انرژی و اگزرژی کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی و پمپ حرارتی توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات تطبیقی انجام شده توسط لی و همکاران [19] نشان داد کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی و کلکتورهای حرارتی خورشیدی عملکرد بهتری از دیدگاه انرژی و اگزرژی نسبت به گرمکن‌های معمولی دارند. علاوه بر این، عملکرد کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی به شدت به شرایط آب و هوایی وابسته است و تابش خورشید و دمای محیط بر راندمان حرارتی و اگزرژی آنها تأثیر می‌گذارد، لذا بررسی عملکرد آنها در شرایط مختلف آب و هوایی اهمیت دارد [20]. سریواستوا و همکاران [21] دریافتند که انرژی و راندمان اگزرژی کلکتورهای فتوولتائیک نصب شده در مرکز انرژی بوپال در هند به ترتیب ۶/۴ درصد و ۸/۵ درصد می‌باشد. آنها همچنین گزارش دادند که افزایش دمای کلکتور فتوولتائیک باعث افزایش تلفات اگزرژی می‌شود و بنابراین، کاهش دما باعث افزایش قابل توجه بازده انرژی و اگزرژی می‌شود.

یزدانی‌فرد و همکاران [22] مطالعات انجام شده بر روی کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی را با جزئیات بررسی کردند و گزارش دادند که اگزرژی سیستم‌های کلکتور فتوولتائیک حرارتی آب، هوا و با نانوسیال نسبت به سیستم‌های کلکتور فتوولتائیک حرارتی معمولی (مبتنی بر ترموالکتریک) موثرتر است. جهرمی و همکاران [23] تحلیل اگزرژی و اقتصادی سیستم کلکتور فتوولتائیک حرارتی را با استفاده از برنامه‌های MATLAB و ترنسیس برای سه شهر دارای شرایط آب و هوایی متفاوت در ایران انجام دادند. در این تحقیق بازده اگزرژی تبریز، شیراز و اصفهان به ترتیب ۹/۷، ۹/۶ و ۹/۶ درصد گزارش شد. با توجه به نتایج تحلیل اقتصادی به دست آمده با روش ارزش فعلی خالص، این سیستم

بستگی به تصمیمات کارآمد در زمینه سیاست‌های عمومی و توسعه و پیشرفت تکنولوژیکی دارد. فیدجو و همکاران [29] طی مطالعه عددی تاثیر میدل‌های حرارتی زمینی و گزینه‌های ذخیره‌سازی حرارتی را به همراه ترکیب‌های احتمالی آنها بر عملکرد تاسیسات پمپ حرارتی گرمایش/سرمایش برای طراحی سالن تجاری انرژی صفر واقع در آب و هوای سرد فنلاند بررسی کردند. اجزای مورد بررسی در این مطالعه عددی، باتری‌ها، تجهیزات انرژی زمین‌گرمایی، کلکتور خورشیدی و نیز گرمای هوای خروجی به عنوان منبع ذخیره حرارتی بودند. یک سال شبیه‌سازی دینامیکی برای پمپ حرارتی با منبع زمینی (GSHP) در محیط شبیه‌سازی IDA-ICE [30] انجام شد و نتایج نشان داد که پمپ حرارتی با منبع زمینی گزینه مناسبی برای منبع حرارت در طراحی ساختمان‌های انرژی صفر است. فتح‌اللهی و همکاران [31] با استفاده از شبیه‌سازی عددی، اثر تعداد پوشش کلکتور خورشیدی بر عملکرد حرارتی سیستم پمپ حرارتی خورشیدی انبساط مستقیم را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق عملکرد حرارتی بلند مدت این سیستم برای گرمایش یک خانه مسکونی در شهر کرمانشاه بررسی شد و نتایج نشان داد در شرایط آب و هوایی کرمانشاه، ساعات کارکرد سیستم در طول ماه‌های سال بین ۳۷ تا ۱۳۰ ساعت تغییر می‌کند. همچنین میانگین ماهانه ضریب عملکرد گرمایی سیستم و بازده کلکتور خورشیدی به ترتیب بین مقادیر ۳/۹۶ تا ۶/۷۱ و ۶۸ تا ۹۹ درصد متغیر بود. مرتضی‌پور و همکاران [32] یک خشک‌کن خورشیدی فتوولتائیک هیبریدی به کمک پمپ حرارتی را برای خشک کردن زعفران مورد مطالعه قرار دادند. آنها تأثیر دماهای مختلف هوای خشک کردن در سه سطح (۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد) و دو حالت مختلف خشک‌کن (با و بدون سیستم پمپ حرارتی) بر فرآیند خشک‌کردن زعفران مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دمای هوا از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتیگراد، زمان خشک شدن ۶۲ درصد کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از پمپ حرارتی همراه با خشک‌کن خورشیدی باعث کاهش رطوبت نسبی هوای خشک‌شدن و در نتیجه افزایش سرعت خشک شدن و کوتاه‌تر شدن دوره خشک‌شدن تا ۴۰ درصد می‌شود. جعفریان و همکاران [33] در یک مطالعه تجربی، یک خشک‌کن خورشیدی به کمک پمپ حرارتی ساختند. آنها به منظور خشک کردن هوا در دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد با سرعت‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه را از روی لایه نازکی از سبزی شوید عبور دادند. همچنین آنها نرخ خشک شدن، نرخ ویژه استخراج رطوبت و مصرف انرژی را مورد ارزیابی قرار دادند. زمان خشک شدن نمونه های شوید (از رطوبت اولیه ۹۰ درصد تا رطوبت نهایی ۱۰ درصد) بدون پمپ حرارتی کمکی بین ۱۹۵ تا ۲۷۵ دقیقه و با پمپ حرارتی کمکی ۸۰ تا ۱۴۰ دقیقه به دست آمد. در این بررسی مشاهده شد با استفاده از پمپ حرارتی، سرعت خشک شدن با افزایش دما در یک سرعت هوای معین افزایش می‌یابد، در نتیجه زمان

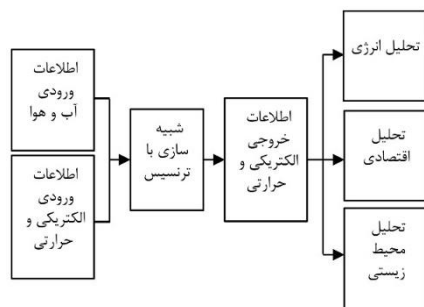
خشک‌شدن کاهش می‌یابد. افزایش سرعت هوا در دمای معین، سرعت خشک‌شدن را بهبود بخشید. همچنین مصرف کل انرژی خشک‌کن با پمپ حرارتی ۱۹ درصد کاهش یافت که نشان دهنده بازده انرژی بالاتر این سیستم است. باقری و همکاران [34] یک پمپ حرارتی جریان متغیر را مدل‌سازی دینامیکی نمودند. آنها در این تحقیق میدل‌های حرارتی را به صورت متغیر با زمان به روش مرز متحرک اصلاح کردند ولی کمپرسور و شیر انبساط را به دلیل شرایط گذرای بسیار سریعتر نسبت به میدل‌ها به صورت پایا مدل کردند. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش خطا نسبت سایر مطالعات انجام شده قبلی از ۱۰ درصد به ۵/۳ درصد بود. همچنین مشاهده شد شرایط گذرا در زمان اعمال تغییر تا ۱۵ درصد روی پارامترهای عملکردی سیستم مانند بار حرارتی تولیدی و ضریب عملکرد تاثیر می‌گذارد. دیارما و همکاران [35] طی مقاله‌ای به فناوری‌های مختلف در ارتباط با سیستم ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان و سیستم ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان و همچنین عملکرد، هزینه و زیبایی‌شناسی آنها پرداختند. این مقاله نشان داد سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان دارای مزایا و پتانسیل قابل توجهی برای استفاده گسترده در ساختمان‌ها می‌باشد و به همین دلیل است که طراحی سیستم‌های ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان در بین معماران و مهندسان طراح مورد توجه قرار گرفته است. کنتی و همکاران [36] یک سیستم ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی را برای یک ساختمان انرژی صفر متصل به شبکه برای یک خوابگاه مزرعه‌ای در ایتالیا طراحی و شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که این سیستم میزان مصرف انرژی تجدید ناپذیر را تا کمتر از آستانه مشخص شده برای ساختمان‌های انرژی صفر (۱۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال [5]) کاهش می‌دهد و نیز کل سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به راه‌حل‌های غیر خورشیدی ۸ درصد کاهش یافته است. حکمت‌پور و همکاران [37] امکان‌سنجی اقتصادی و امکان فنی ساختمان با انرژی خالص صفر در تهران را به صورت عددی انجام دادند و شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه توسط نرم افزار PolySun انجام شد و نتایج نشان داد این سیستم می‌تواند ۷۴ درصد از بار گرمایش و سرمایش و ۶۸/۳ درصد از کل انرژی مصرف شده در ساختمان را تامین کند. یو و همکاران [38] در سال ۲۰۲۱ یک سیستم یکپارچه فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان برای تولید برق و انرژی حرارتی را بررسی کردند. در این مقاله ۷ نوع مختلف سیستم یکپارچه فتوولتائیک حرارتی ساختمان (کلکتور فتوولتائیک خنک شونده توسط هوا، گرمایش فضا، تهویه، گرمایش آب، سیستم فتوولتائیک با مواد جاذب حرارت، سیستم پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان و دیوار ترموالکتریک فتوولتائیک) مورد

سیستم مورد مطالعه یک پمپ حرارتی هوا/هوا ترکیبی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف (شکل ۱) است. هوای محیط از پایین وارد کانال هوای سیستم پمپ حرارتی ترکیبی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف شده و هوای گرم شده بوسیله سیستم پمپ حرارتی ترکیبی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف از بالا توسط یک دمند از طریق کانال هوا به پمپ حرارتی هوا/هوا می‌رسد. به منظور پایداری سیستم در تامین نیاز الکتریکی در ساعاتی که تابش خورشیدی بیشتر از نیاز است و یا مواقعی که تابش خورشیدی کافی نیست، از تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی که شامل شارژ کنترلر، اینورتر و باتری‌ها است، استفاده شده است. برق تولیدی فتوولتائیک صرف تغذیه بار الکتریکی پمپ حرارتی (کمپرسور و فن) و دمند هوای کانال می‌شود.



شکل ۱ نمای شماتیک سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف

در این مقاله یک سیستم پمپ حرارتی (گرمایش/سرمایش) خانگی به کمک کلکتور یکپارچه با سقف به کمک برنامه ترنسیس [41] شبیه سازی شده و از جنبه‌های انرژی، اقتصادی و محیط‌زیستی مورد بررسی قرار گرفته است. روش تحقیق در تجزیه و تحلیل انجام‌گرفته در شکل (۲) نشان داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار دسترسی به داده‌های هواشناسی و تابش متئونرم (Meteonorm) ویرایش ۷/۳۳ [42]، داده‌های مورد نیاز برای شهر تهران استخراج شده و توسط مؤلفه Type15-6 به نرم‌افزار ترنسیس داده شد. این داده‌ها در شکل (۳) و (۴) قابل مشاهده است.



شکل ۲ روش تحقیق در تجزیه و تحلیل

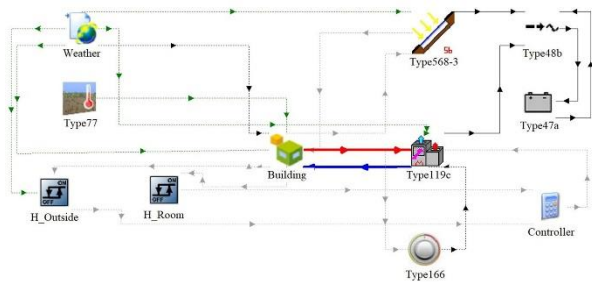
مطالعه قرار گرفت. همچنین در این مطالعه خروجی الکتریکی، عملکرد حرارتی و تأثیرات بر بار گرمایشی/سرمایشی ساختمان به طور جامع برای طرح‌های مختلف معمولی و جدید که در دو دهه گذشته در سطح جهانی توسعه یافته‌اند، بررسی شدند و مزایا و معایب طرح‌های مختلف مورد بحث قرار گرفت. عرب‌کوه‌سار و همکاران [39] در ۲۰۲۲ در یک مطالعه مروری چشم‌انداز وضعیت کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی در ساختمان‌های با انرژی خالص صفر از دیدگاه‌های مختلف ارائه کردند و آینده فناوری را در این چارچوب به تصویر کشیدند. در این مقاله در مورد مزایا و معایب وضعیت عملکرد کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی، پیشرفت‌های طراحی و امکانات یکپارچه‌سازی بحث شد و بررسی‌ها نشان داد که برای بهره‌مندی کافی از پتانسیل کلکتورهای فتوولتائیک حرارتی برای ساختمان‌های هوشمند، برخی از چالش‌های عمده مانند هزینه سرمایه‌گذاری بالا باید مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به بررسی پیشینه تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که پژوهش جامعی شامل بررسی عملکرد ساختمان انرژی صفر با سیستم ترکیبی پمپ حرارتی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف وجود ندارد. نوآوری این مقاله در این موارد است: (۱) در این تحقیق بررسی عملکرد ساختمان انرژی صفر برای تامین گرمایش و سرمایش برای شهر تهران از نظر جنبه‌های انرژی، زیست محیطی و اقتصادی انجام شده است که در مطالعات پیشین به چشم نمی‌خورد. (۲) کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف ساختمان (Roof-BIPVT) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و بازده الکتریکی آن با کلکتور فتوولتائیک معمولی مقایسه شده است. (۳) در تامین بار گرمایشی/سرمایشی از سیستم تولید همزمان پمپ حرارتی منبع هوا و کلکتور فتوولتائیک حرارتی استفاده شده است. (۴) نقش تأثیرات ناشی از تعویض هوا در عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است که در مطالعات پیشین یافت نشد. (۵) بار گرمایشی/سرمایشی یک ساختمان با چند ناحیه مختلف (Multi-Zone) بصورت واقعی شامل بار حرارتی افراد، تجهیزات و روشنایی برای کل سال در نظر گرفته شده است. (۶) تحلیل محیط زیستی با محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از این سیستم صورت پذیرفته است که در پژوهش‌های مرتبط قبلی انجام نشده است.

۲- شرح سیستم و مدل‌سازی

شهر تهران به دلیل دارا بودن بیشترین جمعیت و بیشترین ساختمان‌ها، بیشترین مصرف انرژی را بعنوان پایتخت ایران داشته و با تولید ۶۷۸ میلیون تن دی‌اکسیدکربن در سال ۲۰۲۰ هفتمین کشور انتشاردهنده کربن در جهان بوده است [40]. در این پژوهش عملکرد یک سیستم پمپ حرارتی ترکیبی با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان با انرژی صفر یا (ZEB) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پایاده‌سازی شده است. کاربرد دمای تنظیم شده برای گرمایش و سرمایش و حداکثر نرخ سرمایش و گرمایش را مشخص می‌کند.

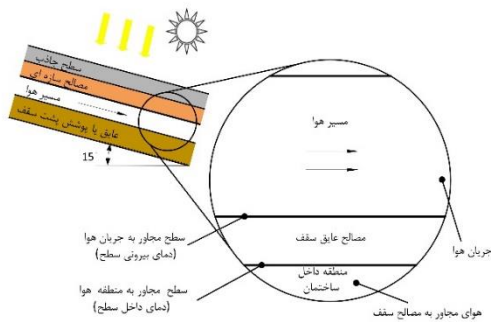


شکل ۵) کلیات مدل ترنسیس برای سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان

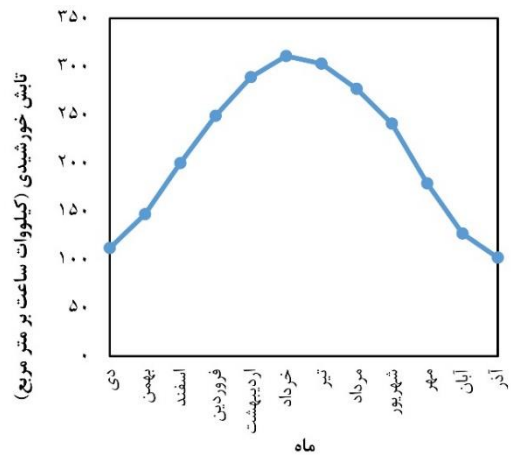
جدول ۱) مؤلفه‌های اصلی انتخاب شده برای قسمت‌های مختلف سیستم در ترنسیس

نام مؤلفه	مؤلفه ترنسیس
اطلاعات آب و هوایی	Type15-6
مدل دمای زمین	Type77
ساختمان چند ناحیه‌ای	Type56
پمپ حرارتی منبع هوا	Type119c
ترموستات	Type166
کنترلر دیفرانسیلی	Type165b
کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با	Type568-3 [43]
باتری ها	Type47a
اینورتر	Type48b

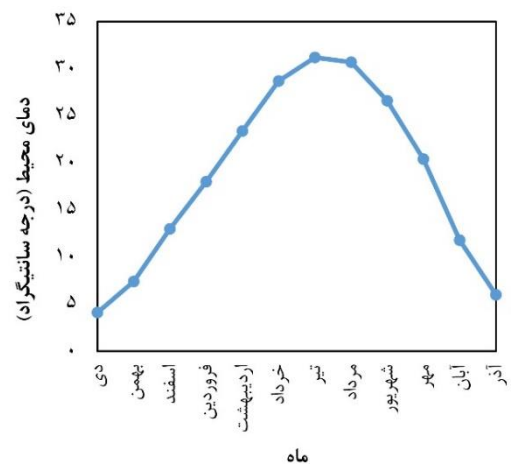
این مشخصات برای هر ناحیه ساختمان می‌تواند متفاوت باشد. سقف با مساحت ۲۶/۲۶ متر مربع کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان از نوع Type568-3 (موجود در کتابخانه TESS) انتخاب شد [44]. کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان با زاویه ۱۵ درجه و زاویه آزیموت صفر درجه قرارگرفت. دمای بازده سلول بیان کننده میزان افت راندمان سلول به ازای هر یک درجه افزایش دما نسبت به یک بازده مشخص (بازده مرجع) می‌باشد. تحت شرایط کار اسمی کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان، تابش سلول ۱۰۰۰ وات برمترمربع، دمای سلول ۲۵ درجه سانتیگراد، بازده سلول ۰/۰۳۲ کلوین به توان منفی یک و بازده مرجع سلول ۱۵ درصد در نظر گرفته شد. جزئیات کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶) شرایط مرزی جزئیات کلکتور فتولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف



شکل ۳) تابش خورشیدی سالیانه در تهران



شکل ۴) دمای سالیانه محیط در تهران

کلیات مدل شبیه سازی سیستم که با استفاده از برنامه شبیه‌سازی ترنسیس تهیه شده است در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد. سپس نتایج انرژی مصرفی و تولیدی ماهانه و سالانه از این برنامه برای تهران به طور جداگانه به دست آمد. اجزای اصلی انتخاب شده در ترنسیس برای قسمت‌های مختلف سیستم در جدول (۱) آورده شده است. گام زمانی شبیه سازی کوچک و معادل پنج دقیقه در نظر گرفته شد تا نتیجه دقیق‌تری در مدل‌سازی بدست بیاید.

برای محاسبه بار سرمایشی/گرمایشی هندسه یک ساختمان چند ناحیه‌ای دو طبقه با سقف شیروانی در نرم‌افزار SketchUp (اسکچ آپ) طراحی گردید و برای معرفی مشخصات ترموفیزیکی اجزا از نرم‌افزار TRNBuild (ترن‌بیلد) ضمیمه ترنسیس ۱۸ می‌باشد، استفاده شد. این نرم‌افزار رفتار حرارتی یک ساختمان را که به مناطق حرارتی مختلف تقسیم شده است، مدل می‌کند [4]. همچنین این نرم‌افزار یک فایل اطلاعاتی تولید می‌کند که خروجی‌ها و ورودی‌های مورد نیاز ساختمان را توصیف می‌نماید. مدل‌سازی ساختمان به وسیله مؤلفه Type56 در ترنسیس

۳- تحلیل انرژی و بازده سیستم

در این تحقیق، راندمان حرارتی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان و ضریب عملکرد پمپ حرارتی با استفاده از معادلات زیر تعیین می‌شود. مقدار گرمای تابش شده به کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان، (Q_{ir}) با معادله (۱) محاسبه می‌شود [44]:

$$Q_{ir} = A \cdot I \quad (1)$$

معادله (۲) خروجی انرژی مفید (Q_{th}) بدست آمده از کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان را نشان می‌دهد.

$$Q_{th} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

بازده حرارتی و الکتریکی کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان به ترتیب توسط معادلات (۳-۱) و (۳-۲) مشخص می‌شوند [27]:

$$\eta_{el} = \frac{Q_{el}}{A \cdot I} \quad \text{و} \quad \eta_{th} = \frac{Q_{th}}{A \cdot I} \quad (3-1 \text{ و } 3-2)$$

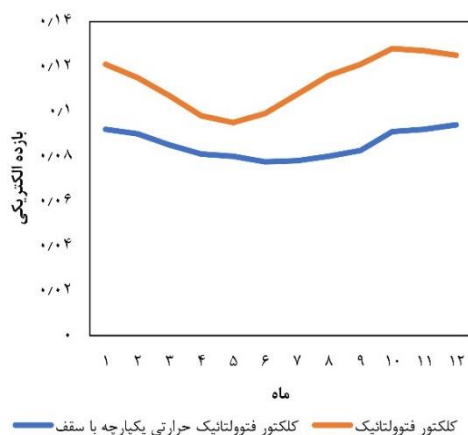
بازده کل کلکتور کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان با معادله (۴) به دست می‌آید.

$$\eta_{total} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (4)$$

ضریب عملکرد پمپ حرارتی [45] با استفاده از معادله (۵) [27] محاسبه می‌شود [46]:

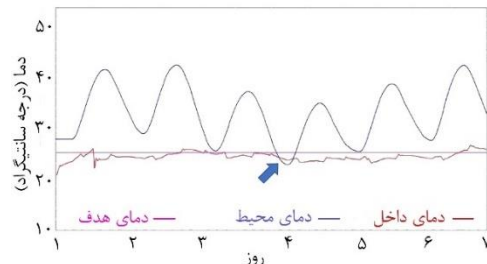
$$COP = \frac{Q_{heat}}{P_{hp}} \quad (5)$$

بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک برای تهران در طی سال در شکل (۹) نشان داده شده است. بدلیل وابستگی راندمان الکتریکی به دمای عملکرد کلکتور فتوولتائیک، راندمان الکتریکی در طول سال بین مقادیر ۹/۵۴ تا ۱۲/۵۳ درصد تغییر می‌کند که علت آن وابستگی راندمان الکتریکی به دمای کار کلکتور فتوولتائیک است. بازده الکتریکی کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف در مقایسه با بازده الکتریکی کلکتور فتوولتائیک معادل در شکل (۹) مقایسه شده است. با مزیت تابش زیاد در ماه مرداد، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با



شکل ۹) بازده الکتریکی سالیانه کلکتور فتوولتائیک در مقایسه با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف

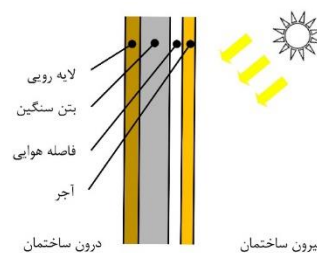
همانطورکه در شکل (۶) نشان داده شده است، دمای هوای خروجی کانال معادل دمای جریان هوای ورودی به فضای ساختمان در نظر گرفته شده و دمای هوای ورودی کانال از مولفه آب و هوا (Type15-6) گرفته شد. سطح جاذب انرژی خورشیدی در معرض پمپ حرارتی با منبع هوا Type119c مجهز به دمپر قابل تنظیم برای ورود هوای تازه است و توسط آن نقش تعویض هوا نشان داده شده است. در حالت سرمایش در مواقعی که دمای محیط از دمای داخل ساختمان سردتر است، برای تامین مستقیم بار سرمایشی از محیط، ورودی هوای تازه باز می‌شود. همچنین در حالت گرمایش وقتی دمای محیط از دمای داخل ساختمان گرم‌تر است، برای تامین مستقیم بار گرمایشی، ورودی هوای تازه باز می‌شود. این موضوع برای هفته اول مرداد ماه در شکل (۷) قابل مشاهده است. بار گرمایشی ساکنین ۸۰۰ کیلوژول بر ساعت، گرمای حاصل از تجهیزات ۱۲۰۰ کیلوژول بر ساعت و گرمای حاصل از روشنایی ۳۲۰۰ کیلوژول بر ساعت از ۸ صبح تا ۵ عصر (هفت روز هفته) در نظر گرفته شد. مصالح مورد استفاده در دیوارها و خواص ترموفیزیکی آنها در جدول (۲) و شماتیک دیوار در شکل (۸) آورده شده است. لایه هوا در دیوار بدون جرم در نظر گرفته شده به این معنی که از نقش ذخیره‌سازی انرژی آن صرف‌نظر شده و فقط نقش مقاومتی (عایق) دارد.



شکل ۷) موقعیت باز دریچه هوا در هفته اول مرداد برای وقتی که هوای بیرون خنک تر است

جدول ۲) مصالح مورد استفاده در دیوارها و خواص ترموفیزیکی آنها

مصالح	مقدار R (hr.m ² .k/kj)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (kj/kg.K)	ضریب هدایت (kj/hr.m.K)	ضخامت (m)
رویه	-	۱۲۵۰	۱/۱	۱/۵	۰/۰۱
بتن سنگین	-	۹۰۰	۰/۸	۲/۴	۰/۱۵
لایه هوا	۰/۰۴۴	-	-	-	-
آجر	-	۲۰۰۰	۰/۹	۴/۸	۰/۱



شکل ۸) شماتیک دیوارهای ساختمان

می‌تواند از نظر مالی پذیرفته شود. هزینه سرمایه‌گذاری هر جزء اصلی برای سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف در شکل (۱۰) آورده شده است.

$$IRR = \sum_{t=0}^n \frac{Bt}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{Ct}{(1+r)^t} \quad (7)$$

در این مطالعه، هزینه‌های مصرف انرژی برای سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. در محاسبات، قیمت واحد برق ۱۵۹۹ ریال به ازای هرکیلووات ساعت^[48] در نظر گرفته شد. مجموع مصرف انرژی سالانه سیستم مورد بحث در مطالعه حاضر ۷۶۴۲ کیلووات ساعت و مجموع تولید انرژی سالانه توسط سیستم ۱۱۸۷۹ کیلووات ساعت بود. تراز ماهانه ریالی انرژی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف در جدول (۴) قابل مشاهده است. همچنین جدول (۵) هزینه‌های مصرف انرژی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان را نشان می‌دهد.

ارزش مثبت اختلاف تولید و مصرف در همه ماه‌ها به جز در دو ماه اول و آخر نشان دهنده تولید مازاد بر مصرف به دلیل تابش زیاد خورشید در این مدت و فروش آن به شبکه است. در محاسبات درآمد حاصل از فروش برق اضافی به شبکه ۹۳۰۰ ریال به ازای هرکیلو وات ساعت در نظر گرفته شد^[48]. درآمد سالانه انرژی الکتریکی ۳۹/۴۱ میلیون ریال به دست آمد. نرخ سود مورد انتظار ۸ درصد، هزینه عملیات سالانه ۱۸ میلیون ریال و طول عمر سیستم ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. مقدار ضرایب Bt و Ct در معادلات مربوطه معادل ۲۹۷۰ و ۲۸۹۷ به دست آمد. با توجه به این مقادیر، ارزش فعلی خالص برابر با ۲۲۰۲ هزار ریال محاسبه

جدول (۴) تراز ماهانه ریالی انرژی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف

ماه	BIPVT (هزارریال)	PV (هزارریال)	بار حرارتی (هزارریال)	تولید (هزارریال)
۱	۱۰۳۸	۱۳۶۴	۱۲۶۷	۱۳۳۳
۲	۱۳۳۰	۱۷۴۸	۱۰۶۷	۱۷۳۳
۳	۱۴۸۰	۱۹۴۵	۷۹۵	۱۹۹۲
۴	۱۶۳۵	۲۱۴۹	۱۰۸۹	۲۲۸۰
۵	۱۷۳۵	۲۲۷۹	۱۵۰۹	۲۴۹۵
۶	۱۸۹۸	۲۴۹۵	۴۶۵	۲۶۵۶
۷	۲۰۳۴	۲۶۷۳	۱۱۷۸	۲۶۶۱
۸	۲۰۱۲	۲۶۴۴	۱۱۶۲	۲۴۵۳
۹	۲۰۳۲	۲۶۷۱	۴۵۷	۲۳۵۲
۱۰	۱۴۸۵	۱۹۵۱	۱۲۷۵	۱۷۵۳
۱۱	۱۲۴۶	۱۶۳۷	۸۵۷	۱۴۴۶
۱۲	۱۰۲۳	۱۳۴۵	۱۰۹۴	۱۲۴۷

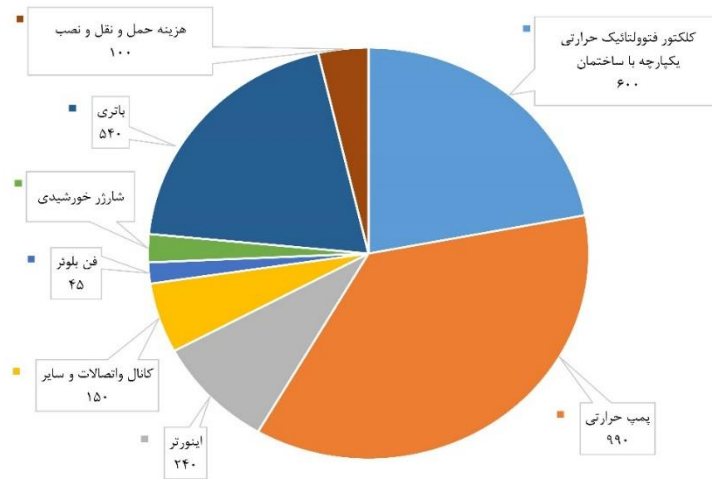
سقف افزایش یافته و در نتیجه گرمای بیشتری توسط پمپ حرارتی استخراج شد. کل میزان انرژی تولیدی سالیانه ۱۴۸۷۹ کیلووات ساعت و کل میزان انرژی سالیانه مصرفی ۷۶۴۲ کیلووات ساعت بدست آمد. مقدار میانگین بازده الکتریکی کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف، ۸/۴۲ درصد بدست آمد در حالیکه این مقدار در شرایط مشابه برای کلکتور فتوولتائیک، ۱۱/۱۴ درصد بدست آمد.

۴- تحلیل اقتصادی سیستم

برای تجزیه و تحلیل جامع عملکرد یک سیستم، ارزیابی سرمایه‌گذاری‌های مالی که بر اساس پارامترهایی مانند نرخ تنزیل، نرخ تورم و ریسک انجام می‌شود، اهمیت دارد. تکنیک‌های مختلفی برای تحلیل اقتصادی بر اساس مدل‌های آماری یا پویا وجود دارد. در روش‌های آماری، ارزیابی که بر اساس هزینه‌ها و درآمدها صورت می‌گیرد، تنها به سوابق حسابداری یک دوره‌ای محدود می‌شود. با این حال، در مدل‌های پویا، تمام هزینه‌ها از جمله ارزش زمانی پول، درآمدهای مورد انتظار و هزینه‌های مرتبط با پروژه سرمایه‌گذاری در طول عمر پروژه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین دقت در روش‌های پویا برای ارزیابی سودآوری پروژه‌ها بیشتر از روش‌های آماری است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ارزش اقتصادی یک پروژه در روش‌های پویا وجود دارد. در این مطالعه، روش‌های ارزش فعلی خالص (NPV) و نرخ بازده داخلی (IRR) به دلیل محبوب‌تر و پرکاربردتر بودن برای تحلیل اقتصادی انتخاب شدند. این روش‌ها بر اساس تمام گردش مالی آتی در طول دوره پروژه است. روش ارزش فعلی خالص افزایش ارزش سرمایه‌گذاری را محاسبه می‌کند و نرخ بازده داخلی بازده پروژه را به صورت درصد اندازه‌گیری می‌کند. ارزش فعلی خالص تفاوت بین ارزش فعلی تنزیل شده گردش مالی ورودی و سرمایه‌گذاری اولیه است و می‌توان آن را با استفاده از معادله (۶) محاسبه کرد^[47]. اگر ارزش فعلی خالص دارای مقدار مثبت باشد، پروژه امکان پذیر است و می‌توان آن را پذیرفت. اگر مقدار منفی داشته باشد، نباید اجرا شود زیرا حداقل بازده مورد نیاز به دست نخواهد آمد. اگر ارزش فعلی خالص برابر با صفر باشد، به این معنی است که میزان درآمد سالانه فقط پوشش‌دهنده هزینه‌های عملیاتی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه است.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{Bt}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{Ct}{(1+r)^t} \quad (6)$$

نرخ تنزیل نرخ بازده مورد انتظار از سرمایه‌گذاری را بیان می‌کند و به طور قابل توجهی بر نتیجه تحلیل تاثیر می‌گذارد. نرخ بازده داخلی که نرخ تنزیل است و ارزش فعلی خالص را صفر می‌کند، نشان‌دهنده بازده واقعی بهره در طول عمر پروژه است. مقدار نرخ بازده داخلی را می‌توان با استفاده از معادله (۷) محاسبه کرد^[47]. اگر این مقدار برابر یا بیشتر از نرخ بازده مورد نیاز باشد، پروژه



شکل ۱۰) هزینه سرمایه‌گذاری اجزاء سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف (جمع کل هزینه ۲۷۲۵۰ میلیون ریال)

جدول ۵) تراز ماهانه انرژی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف

ماه	IT (kWh)	BIPVT (kWh)	PV (kWh)	بار (kWh)	تولید (kWh)	تولید-بار (kWh)
۱	۶۹۹۹	۶۴۹	۸۵۳	۷۹۲	۶۴۹	-۱۴۳
۲	۹۳۹۰	۸۴۳	۱۰۹۳	۶۶۷	۸۴۳	۱۷۶
۳	۱۱۲۲۵	۹۶۹	۱۲۱۶	۴۹۷	۹۶۹	۴۷۲
۴	۱۳۳۳۶	۱۱۰۹	۱۳۴۴	۶۸۱	۱۱۰۹	۴۲۸
۵	۱۴۹۶۸	۱۲۱۴	۱۴۲۵	۹۴۴	۱۲۱۴	۲۷۰
۶	۱۶۴۱۵	۱۲۹۲	۱۵۶۰	۲۹۱	۱۲۹۲	۱۰۰۲
۷	۱۶۸۶۵	۱۲۹۵	۱۶۷۱	۷۳۱	۱۲۹۵	۵۵۸
۸	۱۵۴۳۲	۱۱۹۴	۱۶۵۴	۷۲۶	۱۱۹۴	۵۶۷
۹	۱۴۳۵۲	۱۱۴۵	۱۶۷۰	۲۸۵	۱۱۴۵	۸۵۹
۱۰	۱۰۱۴۷	۸۵۳	۱۲۲۰	۷۹۷	۸۵۳	۵۶
۱۱	۷۹۶۶	۷۰۴	۱۰۲۴	۵۳۵	۷۰۴	۱۶۸
۱۲	۶۶۱۰	۶۰۷	۸۴۱	۶۸۴	۶۰۷	-۷۷

استفاده سیستم ترکیبی با گازهای گلخانه‌ای حاصل از گرمایش بوسیله گاز طبیعی و برق مقایسه می‌شود. روش برآورد انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع مختلف توسط وزارت نفت در سند MOP-HSED-GL-307 تشریح شده است [49]. میزان انتشار هر یک از سه گاز گلخانه‌ای CO₂، CH₄ و N₂O از منابع احتراقی ثابت، از حاصلضرب مقدار مصرف هر یک از سوخت‌های مصرفی در ارزش حرارتی و ضریب انتشار آن سوخت مطابق معادله (۸) به دست می‌آید:

$$EF_{i,j} \times E_{c,i,j} = Q_i \times LHV_i \quad (8)$$

کل انتشارات گلخانه‌ای احتراقی، از حاصل جمع انتشارات احتراقی مربوط به همه سوخت‌های مصرف شده) با احتساب قابلیت گرمایش جهانی هر گاز گلخانه‌ای از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$E_c = \sum_j \sum_i (E_{c,i,j} \times GWP_i) \quad (9)$$

انتشارات غیرمستقیم مربوط به خرید برق از شبکه سراسری برق کشور، از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$E_{ID,GE,CO_2} = \frac{EI_{grid} \times EI_{GE,CO_2}}{1 - TDL} \quad (10)$$

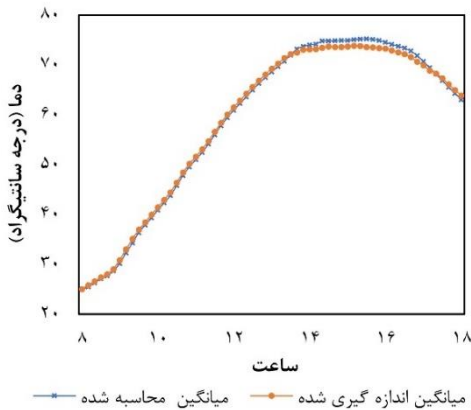
شد. از آنجایی که این مقدار بیشتر از صفر است، سرمایه‌گذاری قابل قبول به نظر می‌رسد. در صورتی که نرخ تنزیل ۵ درصد در نظر گرفته شود، نرخ بازده داخلی برابر با ۸۱۸/۹ است. از آنجایی که این مقدار برابر با صفر نبود، نرخ بازده داخلی با پذیرش نرخ تنزیل ۱۰ درصد دوباره محاسبه شد و ۲۹۴/۳- بدست آمد. هنگامی که بین این نتایج درونیابی انجام شد، نرخ بازده داخلی ۸/۴ درصد به دست آمد. به دلیل اینکه نرخ تنزیل بیشتر از ۸ درصد است، سرمایه‌گذاری امکان‌پذیر است. با توجه به نتایج هر دو روش ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی، سرمایه‌گذاری سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف توجیه‌پذیر است.

۵- تحلیل محیط زیستی سیستم

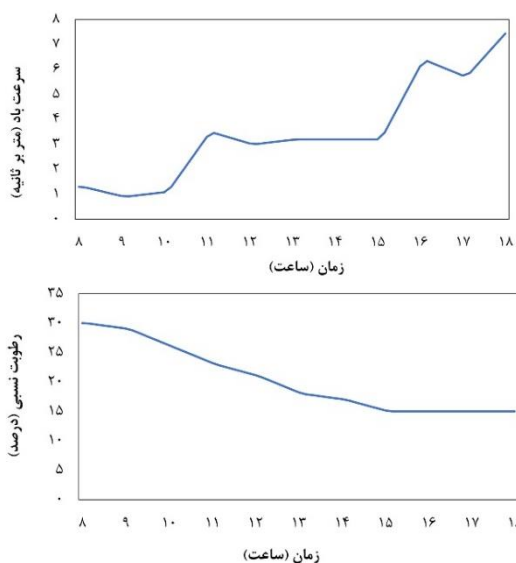
بخش ساختمان ۳۹ درصد از انتشار CO₂ جهانی را منتشر می‌کند، که ۲۸ درصد آن از بهره‌برداری ساختمان‌ها است. درصد انتشار کل CO₂ در بخش بهره‌برداری از ساختمان‌ها بسته به سیستم گرمایش آنها متفاوت است [6]. در این قسمت گازهای گلخانه‌ای حاصل از

نتایج شبیه‌سازی به خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت داشت. مقادیر RMSE1، RMSE2 و R-squared به ترتیب ۰/۲۹۰۹، ۰/۰۰۵۸ و ۰/۹۵۵۱ به دست آمد. با مزیت تابش زیاد در ماه مرداد، اختلاف دمای هوای ورودی و خروجی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف افزایش یافته و در نتیجه گرمای بیشتری توسط پمپ حرارتی استخراج شد. ضریب عملکرد^[45] در طی سال بین ۱/۴۵ تا ۲/۹۴ تغییر کرد. مقدار میانگین بازده الکتریکی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف، ۱۰/۸۴ درصد بدست آمد در حالیکه این مقدار در شرایط مشابه برای کلکتور فتوولتائیک، ۱۲/۷۶ درصد بدست آمد.

بخاطر اینکه راندمان الکتریکی بسته به دمای عملکرد کلکتور فتوولتائیک تغییر می‌کند و خنک کاری باعث افزایش راندمان می‌شود، راندمان الکتریکی سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف بین مقادیر ۷/۶۸ تا ۹/۲۶ درصد در طول سال تغییر کرد.

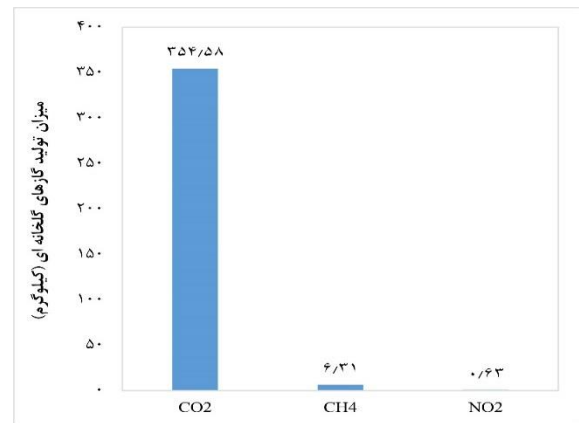


شکل ۱۲) مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده دمای مخزن آب ذخیره در روز اندازه‌گیری از ساعت ۸ تا ۱۸



شکل ۱۳) دمای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده مخزن از ساعت ۸ تا ۱۸

در محاسبات ارزش حرارتی خالص گاز طبیعی ۳۴۲۰۰ کیلوژول بر متر مکعب در نظر گرفته شده است^[49] و به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی حرارتی میزان تولید CO2 معدل ۲۵۴ گرم، میزان تولید CH4، ۰/۰۰۴۵ گرم و میزان تولید NO2، ۰/۰۰۰۴۵ گرم در نظر گرفته شد. بر همین اساس میزان انتشار سالیانه گازهای گلخانه‌ای توسط سیستم مورد بررسی معادل ۳۵۴/۵۸ کیلوگرم CO2، ۶/۳۱ گرم CH4 و ۰/۶۳ گرم N2O برای شهر تهران محاسبه شد.



شکل ۱۱) میزان تولید گازهای گلخانه‌ای (کیلوگرم)

۶- اعتبارسنجی و نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده توسط بهاتارای و همکاران^[50] در روز مشابه سال از ساعت ۸:۰۰ صبح تا ساعت ۶:۰۰ بعد از ظهر مقایسه و اعتبارسنجی شده است. پارامترهای آب و هوایی در این روز در فواصل ۵ دقیقه‌ای ثبت شده که در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. نتایج تجربی و شبیه‌سازی تغییر دمای آب مخزن در شکل (۸) نشان داده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده دمای آب در مخزن ذخیره از ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد تا ۷۰/۶۸ درجه سانتی‌گراد و مقادیر پیش‌بینی شده از ۲۴/۲ تا ۶۹/۵۱ سانتی‌گراد متغیر بود (شکل (۱۲)). انحراف بهینه بین حداکثر مقدار مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده بیش از ۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد نبود (شکل (۱۳)). مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE1)، ریشه میانگین مربع انحراف نرمال شده (RMSE2) و R-squared که معیار نشان دهنده نزدیکی مقادیر پیش‌بینی شده به داده‌های اندازه‌گیری شده است توسط معادلات (۱۱) تا (۱۳) به دست می‌آیند.

$$RMSE_1 = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m d_j^2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

$$RMSE_2 = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{d_j}{Y_j} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$R - \text{squared} = \frac{\left[m \sum_{j=1}^m X_j Y_j - \left(\sum_{j=1}^m X_j \right) \left(\sum_{j=1}^m Y_j \right) \right]^2}{\left[m \sum_{j=1}^m X_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m X_j \right)^2 \right] \left[m \sum_{j=1}^m Y_j^2 - \left(\sum_{j=1}^m Y_j \right)^2 \right]} \quad (13)$$

فهرست علائم

I	مقدار تابش خورشیدی (kj/hr.m2)
m	نرخ جریان جرمی سیال کلکتور BIPVT (kg/hr)
Cp	گرمای ویژه هوا (kj/kg.K)
Tin	دمای هوای ورودی (°C)
Tout	دمای هوای خروجی (°C)
η_{th}	بازده حرارتی
η_e	بازده الکتریکی
Q _{ir}	مقدار گرمای تابش شده به کلکتور BIPVT (kj/m2)
Q _{el}	مقدار برق تولیدی کلکتور BIPVT (kj/m2)
η_{total}	بازده کل کلکتور BIPVT
Q _{heat}	مقدار انرژی انتقالی مفید توسط پمپ حرارتی (kj/m2)
Php	مقدار توان الکتریکی مصرف شده توسط پمپ حرارتی (kj/hr.m2)
COP	ضریب عملکرد پمپ حرارتی
COPPV/T	ضریب عملکرد سیستم فتوولتائیک-حرارتی
i	شماره سوخت (اعم از گاز طبیعی، نفت گاز، نفت کوره و ...)
j	شماره گاز گلخانه‌ای CH ₄ ، N ₂ O و CO ₂
Q _i	مقدار کل مصرف سالانه سوخت (Sm ³ برای سوخت‌های گازی و L برای سوخت‌های مایع)
EF _{i,j}	ضریب انتشار گاز گلخانه‌ای z برای سوخت i (ton/GJ)
EFCO ₂ , GE	ضریب انتشار CO ₂ برای برق شبکه (MWh/tonCO ₂)
E _{id,GE,CO₂}	انتشار غیر مستقیم CO ₂ ناشی از خرید برق از شبکه سراسری (tonCO ₂)
EC _{i,j}	میزان انتشار سالانه گاز گلخانه‌ای z حاصل از احتراق سوخت i (ton)
EC	میزان کل انتشار سالانه گازهای گلخانه‌ای احتراقی (tonCO ₂ e)
LHV _i	ارزش حرارتی خالص سوخت i (GJ/Sm ³ و GJ/L برای سوخت‌های مایع)
GWP _j	قابلیت گرمایش جهانی گاز گلخانه‌ای z
Elgrid	مقدار سالانه برق دریافتی از شبکه سراسری (MW.hr)
TDL	تلفات شبکه انتقال و توزیع برق (کسری از ۱)
NPV	افزایش ارزش سرمایه‌گذاری
IRR	بازده پروژه (درصد)
Bt	گردش مالی ورودی
Ct	گردش مالی خروجی
t	تعداد سال‌ها
r	نرخ تنزیل
n	طول عمر پروژه
CCO ₂	هزینه جرمه انتشار CO ₂

سهم نویسندگان: علیرضا اسدی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۳/۳٪)؛ فرزاد جعفر کاظمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۳۳/۳٪)؛ محمد حسن جلال الدین ابیانه (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۳۳/۳٪).

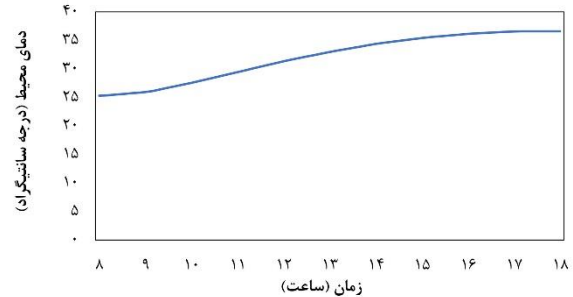
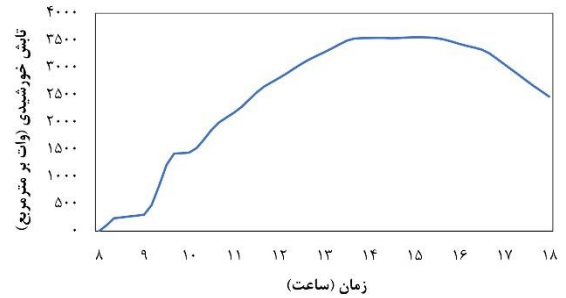
تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

1- Miglioli A, Aste N, Del Pero C, Leonforte F. Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: Integration and



شکل ۱۴) مقادیر اندازه‌گیری شده از ساعت ۸ تا ۱۸ از راست به چپ

مجموع مصرف انرژی سالانه سیستم مورد بحث در مطالعه حاضر ۷۶۴۲ کیلووات ساعت و مجموع تولید انرژی سالانه توسط سیستم ۱۱۸۷۹ کیلووات ساعت بود. همچنین انرژی مصرفی پمپ حرارتی در طی سال بین ۲۸۵ تا ۹۹۴ کیلووات ساعت تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده شد، تولید انرژی حرارتی در ماه‌های تابستان افزایش یافت و بیشترین و کمترین مقدار تولید انرژی حرارتی به ترتیب در مرداد و دی بود و حداکثر راندمان حرارتی در تیر ماه و حداقل راندمان در ماه اسفند بود. جمع کل هزینه سرمایه‌گذاری اجزاء اصلی برای سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف ۲۷۲۵۰۰۰ ریال برآورد شد و درآمد خالص سالانه انرژی در هر دو فصل سرمایش و گرمایش ۳۹/۴ میلیون ریال بود. سپس با استفاده از دو روش ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی تحلیل اقتصادی انجام شد. نرخ سود مورد انتظار ۸ درصد، هزینه عملیات سالانه ۱۵ میلیون ریال و طول عمر سیستم ۲۰ سال در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج هر دو روش، سرمایه‌گذاری سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف توجیه‌پذیر بود.

از دیدگاه محیط زیستی میزان انتشار سالیانه CO₂ در سیستم ترکیبی پمپ حرارتی منبع هوا با کلکتور فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با سقف ۳۵۴ کیلوگرم و میزان CH₄ و N₂O به ترتیب ۳/۶ و ۰/۶۳ گرم بود. نهایتاً حتی با کمترین بازده ماهانه برای این سیستم، مصرف انرژی اولیه تجدید ناپذیر معادل ۹/۱۹ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال به دست آمد که کمتر از مقدار آستانه انرژی گرمایشی برای ساختمان انرژی صفر (۱۵ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال بود) و سیستم پیشنهادی شرایط ساختمان انرژی صفر را به خوبی برآورده کرد

- of hybrid PV/T systems under different climate scenarios and energy tariffs. *Solar Energy*. 2020 Dec 1;212:191-202.
- 19- Li M, Zhong D, Ma T, Kazemian A, Gu W. Photovoltaic thermal module and solar thermal collector connected in series: Energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*. 2020 Feb 15;206:112479.
- 20- Song Z, Ji J, Cai J, Li Z, Yu B. The performance comparison of the direct-expansion solar assisted heat pumps with three different PV evaporators. *Energy Conversion and Management*. 2020 Jun 1;213:112781.
- 21- Sudhakar K, Srivastava T. Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module. *International Journal of Ambient Energy*. 2014 Jan 2;35(1):51-7.
- 22- Yazdanifard F, Ameri M. Exergetic advancement of photovoltaic/thermal systems (PV/T): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Dec 1;97:529-53.
- 23- Jahromi SN, Vadiiee A, Yaghoubi M. Exergy and economic evaluation of a commercially available PV/T collector for different climates in Iran. *Energy Procedia*. 2015 Aug 1;75:444-56.
- 24- Al-Waeli AH, Kazem HA, Chaichan MT, Sopian K. Photovoltaic/thermal (PV/T) systems: principles, design, and applications. Springer Nature; 2019 Oct.
- 25- Bellos E, Tzivanidis C, Moschos K, Antonopoulos KA. Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems. *Energy Conversion and Management*. 2016 Jul 15;120:306-19.
- 26- Suleman F, Dincer I, Agelin-Chaab M. Energy and exergy analyses of an integrated solar heat pump system. *Applied Thermal Engineering*. 2014 Dec 5;73(1):559-66.
- 27- Zhang X, Zhao X, Shen J, Hu X, Liu X, Xu J. Design, fabrication and experimental study of a solar photovoltaic/loop-heat-pipe based heat pump system. *Solar energy*. 2013 Nov 1;97:551-68.
- 28- James T, Goodrich A, Woodhouse M, Margolis R, Ong S. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the residential sector: an analysis of installed rooftop system prices. *National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States)*; 2011 Nov 1.
- 29- Fadejev J, Simson R, Kurnitski J, Kesti J, Mononen T, Lautso P. Geothermal heat pump plant performance in a nearly zero-energy building. *Energy Procedia*. 2016 Sep 1;96:489-502.
- 30- Kalamees T. IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy and HAM analysis. *Annex*. 2004 May;41:12-4.
- 31- Safarzarzadeh H, Fathollahi S. Simulation Study on the Thermal Performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in Kermanshah climate. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Feb 10;15(12):232-42.
- 32- Morteza-pour H, Ghoobadian B, Khoshtaghaza MH, Minaei S. Drying kinetics and quality design methods. *Energy and Built Environment*. 2021 Jul 30.
- 2- Aberoumand S, Ghamari S, Shabani B. Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PV/T) system using nanofluids: An experimental study. *Solar Energy*. 2018 May 1;165:167-77.
- 3- Bae S, Chae S, Nam Y. Performance Analysis of Integrated Photovoltaic-Thermal and Air Source Heat Pump System through Energy Simulation. *Energies*. 2022 Jan 12;15(2):528.
- 4- Klein SA, Beckman WA. TRNSYS 18: A transient system simulation program: Standard Component Library Overview. *TRNSYS*. 2017;3:389-96.
- 5- Thomas Boermans AH, Sven Schimschar, Jan Grözinger, Markus Offermann. Principles for Nearly Zero-Energy Buildings. *Ecofys Germany GmbH*; 2020.
- 6- ENERGY I, AGENCY. *World Energy Outlook 2021*. IEA, Paris; 2021.
- 7- Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*. 2008 Jan 1;40(3):394-8.
- 8- Roaf S, Brotas L, Nicol F. Counting the costs of comfort. *Building Research & Information*. 2015 May 4;43(3):269-73.
- 9- IEA. *Net Zero by 2050*. Paris IEA; 2021.
- 10- IEA. *Heat Pumps*. Paris 2021.
- 11- Rimbala J, Kyncl J. The possibilities of reducing energy consumption for the preparation of hot water by suitable switching of the heat pump. In *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE) 2020 Oct 19 (pp. 1-4)*. IEEE.
- 12- Smitt S, Tolstorebrov I, Gullo P, Pardiñas A, Hafner A. Energy use and retrofitting potential of heat pumps in cold climate hotels. *Journal of Cleaner Production*. 2021 May 20;298:126799.
- 13- Kosoi AS, Antipov YA, Shkarin KV, Shatalov IK, Sokolov DD. A multistage heat pump unit model for reducing energy consumption of space heating at low ambient temperatures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021 Feb 1 (Vol. 1100, No. 1, p. 012045)*. IOP Publishing.
- 14- Zuev OA, Garanov SA, Ivanova EV, Karpukhin AS. Investigation of the efficiency of autocascade and cascade heat pumps in cold climate. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020 Sep;56(5):448-55.
- 15- Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons; 2013 Apr 15.
- 16- Ghorbani B, Mehrpooya M, Sadeghzadeh M. Developing a tri-generation system of power, heating, and freshwater (for an industrial town) by using solar flat plate collectors, multi-stage desalination unit, and Kalina power generation cycle. *Energy Conversion and Management*. 2018 Jun 1;165:113-26.
- 17- Vallati A, Ocloń P, Colucci C, Mauri L, de Lieto Vollaro R, Taler J. Energy analysis of a thermal system composed by a heat pump coupled with a PVT solar collector. *Energy*. 2019 May 1;174:91-6.
- 18- Aguilar-Jiménez JA, Hernández-Callejo L, Alonso-Gómez V, Velázquez N, López-Zavala R, Acuña A, Mariano-Hernández D. Techno-economic analysis

Available from: <https://hse.nipc.ir/uploads/mop-۳۰۷pdf>.

50- Bhattarai S, Oh JH, Euh SH, Kafle GK, Kim DH. Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012 Aug 1;103:184-93.

characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer.

- 33- Jafarian H, Tabatabaekoloor R, Seyedi SR. Experimental Investigation on Dill Drying in a Solar-Assisted Heat Pump Dryer.
- 34- Bagheri Fahraji E, Maerefat M. Dynamic Modeling of Air to Air Variable Refrigerant Flow Heat Pump System. *Modares Mechanical Engineering*. 2018 Jan 10;17(11):397-407.
- 35- Debbarma M, Sudhakar K, Baredar P. Comparison of BIPV and BIPVT: A review. *Resource-Efficient Technologies*. 2017 Sep 1;3(3):263-71.
- 36- Conti P, Schito E, Testi D. Cost-benefit analysis of hybrid photovoltaic/thermal collectors in a nearly zero-energy building. *Energies*. 2019 Apr 25;12(8):1582.
- 37- Hekmatipour F, Jalali M, Marofi A. Economic Feasibility and Technical Possibility of Net-Zero Energy Building in Tehran. *Indian Journal of Science and Technology*. 2019 Jul;12:25.
- 38- Yu G, Yang H, Yan Z, Ansah MK. A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (BIPVT) systems. *Applied thermal engineering*. 2021 Jan 5;182:116081.
- 39- Arabkoohsar A, Xie G, Wei J, Asok A, Behzadi A, Mahian O. Perspectives and review of photovoltaic-thermal panels in net-zero energy buildings. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022 Jan 24:1-0.
- 40- Crippa M, Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. and Vignati, E. Fossil CO2 emissions of all world countries - 2020 Report. 2020.
- 41- Klein SA, Beckman WA. TRNSYS 18: A transient system simulation program: mathematical reference. *TRNSYS*. 2017;4:389-96.
- 42- Meteonorm [Internet]. 2021. Available from: meteonorm.com.
- 43- TESS T. TESS COMPONENT LIBRARIES.
- 44- Khatri KK, Singh AK. Energy and exergy analysis of a solar tri-generation system using TRNSYS. *Dimension*. 2016;2(2.1):1-8.
- 45- Wang X, Xia L, Bales C, Zhang X, Copertaro B, Pan S, Wu J. A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. *Renewable Energy*. 2020 Feb 1;146:2472-87.
- 46- Sopian K, Alwaeli AH, Kazem HA. Advanced photovoltaic thermal collectors. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part e: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2020 Apr;234(2):206-13.
- 47- Öztürk M, Çalışır O, Genç G. Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021 Aug;145(3):1431-43.
- 48- Energy IsMo. Electricity tariff 2021: Ministry of Energy; 2022 [Available from: <https://tariff.moe.gov.ir/>]
- 49- Oil Mo. MOP-HSED-GL-307 2021 [Guide to calculating and reporting greenhouse gas emissions].