



Design and Feasibility Analysis of a HVAC System Based on CCHP, Solar Heating and Ice Thermal Storage for Residential Buildings

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Etemad A.¹

Abdalisousan A.^{2*}

Aliehyaei M.³

How to cite this article

A. Etemad, A. Abdalisousan, M. Aliehyaei, Design and Feasibility Analysis of a HVAC System Based on CCHP, Solar Heating and Ice Thermal Storage for Residential Buildings, Modares Mechanical Engineering, Modares Mechanical Engineering, 2022;22(02):81-92.

¹ Department of Energy Engineering and Economics, Science and research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of engineering, Astara branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

³ Department of mechanical engineering, Pardis Branch, Islamic Azad University, Pardis, Iran.

*Correspondence

Address: Department of engineering, Astara branch, Islamic Azad University, Astara, Iran.

Ashkan.abdali@gmail.com

Article History

Received: October 05, 2020

Accepted: July 27, 2021

ePublished: December 25, 2022

ABSTRACT

A significant portion of world energy consumption belongs to building sector, And HVAC systems have an important share in building energy usage. In this research, a novel HVAC system has been proposed which is based on three technologies of combined heating and power, ice thermal energy storage, and solar heating. The system is named CCHP-ITESS as an abbreviation of previously mentioned technologies. This system was modeled on a case study building in Tehran, to obtain energy consumption, costs, and payback results in comparison with conventional HVAC systems. In order to realize the effect of energy prices on the economical results, the same system and building were simulated for the city of Los Angeles, California, US. The results showed that both scenarios will lead to significant reduction in net source energy consumption, which is 36.87% reduction in Tehran and 40.28% reduction in Los Angeles. However, the system is not economically reasonable in Tehran because of the low energy prices and has a 39 years of payback period, but is absolutely feasible in Los Angeles with ab payback period of less than 3.5 years. As a result, application of this system is feasible in Los Angeles and not feasible in Tehran.

Keywords Combined Heating and Power, Ice Thermal Energy Storage, Solar Heating, Air Conditioning, Thermoconomics

CITATION LINKS

[1] Keeping global warming within 1.5 C constrains emergence of aridification. [2] The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis. [3] Iran Energy Balance Sheet. [4] Hybrid solar-assisted combined cooling, heating, and power systems: A review. [5] Integrated adsorption-based multigeneration systems: A critical review and future trends. [6] Exergy analysis in combined heat and power systems: A review. [7] Thermodynamic performance analyses for CCHP system coupled with organic Rankine cycle and solar thermal utilization under a novel operation strategy. [8] Design and feasibility study of combined heat and power systems integrated with heat pump. [9] Performance Analysis of Indirect Absorption Chiller based on CHP System Components. [10] Energy and emissions analysis of ice thermal energy storage in the western US. [11] analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications. [12] Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors. [13] Optimal energy reduction schedules for ice storage air-conditioning systems. [14] Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings. [15] Model-based predictive control of an ice storage device in a building cooling system. [16] Energy and cost assessment of packaged ice energy storage implementations using OpenStudio Measures. [17] Case studies of thermal energy storage (TES) systems: Evaluation and verification of system performance. [18] An evaluation of heat transfer and effectiveness for unglazed transpired solar air heaters. [19] Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production. [20] Nanofluids for improved efficiency in cooling solar collectors—a review. [21] Climatic data for building design standards. [22] ASHRAE Handbook HVAC systems and equipment. [23] Performance assessment of some ice TES systems. [24] Energy Star. [25] New energy technologies, innovation and clean coal. [26] Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications. [27] Iran Electricity Tariff. [28] Iran CHP Power Feed-in Tariff. [29] SCE Electricity Tariff [30] Central Bank of Iran: Inflation rate.

طراحی و امکان‌سنجی سیستم تهویه مطبوع مبتنی بر CHP، گرمایش خورشیدی و سیستم ذخیره انرژی یخ برای ساختمان‌های مسکونی

علیرضا اعتماد

گروه مهندسی انرژی و اقتصاد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

اشکان عبدالی سوسن*

گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی، آستارا، ایران

مهدی علی‌احیایی

گروه مهندسی مکانیک، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، ایران

چکیده

بخش قابل توجهی از مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست در جهان به صنعت ساختمان اختصاص دارد. در این میان سیستم‌های تهویه مطبوع سهم مهمی از مصرف انرژی ساختمان دارند. در این تحقیق، یک سیستم نوین تهویه مطبوع بر اساس ترکیب سه فناوری تولید همزمان برق و حرارت، ذخیره انرژی یخ، و گرمایش خورشیدی طراحی و مدل‌سازی شده است. این سیستم به اختصار CCHP-ITESS نامیده شده است که برگرفته از اختصارات سه فناوری فوق‌الذکر است. به‌عنوان مطالعه موردی، امکان‌سنجی پیاده‌سازی این سیستم در یک ساختمان مسکونی در شهر تهران از نظر مصرف انرژی و توجیه‌پذیری اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مصرف انرژی، هزینه و دوره برگشت سرمایه برای این پروژه برای شهر تهران بررسی شده و به منظور ارزیابی تأثیر تعرفه‌های انرژی بر توجیه‌پذیری اقتصادی، سیستم پیشنهادی بر روی همان ساختمان مورد مطالعه در شرایط آب و هوایی و تعرفه‌های انرژی شهر لس‌آنجلس در ایالت کالیفرنیا آمریکا مدل‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو سناریو، به‌کارگیری سیستم پیشنهادی منجر به کاهش قابل توجه انرژی مبدا می‌گردد که این کاهش برای تهران ۳۶/۸۷ درصد و برای لس‌آنجلس ۴۰/۲۸ درصد است. اما به دلیل تفاوت در تعرفه‌های انرژی، دوره بازگشت سرمایه این سیستم در تهران حدود ۳۹ سال و در لس‌آنجلس حدود ۳/۲ سال می‌باشد. در نتیجه به‌کارگیری این سیستم در شرایط شهر تهران توجیه‌ناپذیر و در آمریکا، توجیه‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: تولید هم‌زمان برق و حرارت، ذخیره انرژی حرارتی یخ، گرمایش خورشیدی، تهویه مطبوع، ترموآکونومیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۵

*نویسنده مسئول: Ashkan.abdali@gmail.com

۱- مقدمه

۱-۱- اهمیت پژوهش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان

مصرف بی‌رویه انرژی در قرن گذشته و رشد تقاضای انرژی جهان در سال‌های اخیر اثرات جبران‌ناپذیری از قبیل گرمایش زمین، آلودگی منابع آبی، انقراض گونه‌های جانوری و گیاهی و غیره بر محیط‌زیست وارد کرده است. این در حالی است که با توجه به مطالعه اخیر مجله نیچر در صورتی‌که تا سال ۲۱۰۰ میلادی برنامه محدود کردن افزایش دمای کره زمین تا $1/5^{\circ}\text{C}$ مدنظر باشد،

می‌بایست انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۶۰ میلادی در جو زمین متوقف شود^[1]. مسائل مذکور و مشکلات دیگری از قبیل افزایش روزافزون مصرف انرژی و عدم امنیت حامل‌های انرژی باعث شده است تا بحث توسعه پایدار مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گیرد و مسیر توسعه خود را بر اساس معیارهای پایداری هموار سازند. در این میان، صرفه‌جویی انرژی و جایگزینی استفاده از منابع فسیلی با منابع انرژی تجدیدپذیر از مهم‌ترین راهکارها برای جلوگیری یا کاهش اثرات مذکور، برقراری تعادل اکولوژیک و حرکت به سمت توسعه پایدار جهان به شمار می‌رود. یکی از اصلی‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده انرژی در جهان، بخش ساختمان است. به‌گونه‌ای که بخش ساختمان و فعالیت‌های انسان در ساختمان ۳۱٪ از تقاضای انرژی نهایی کل و حدود یک سوم آلاینده‌های گاز کربن دی‌اکسید را در جهان در برمی‌گیرد^[2].

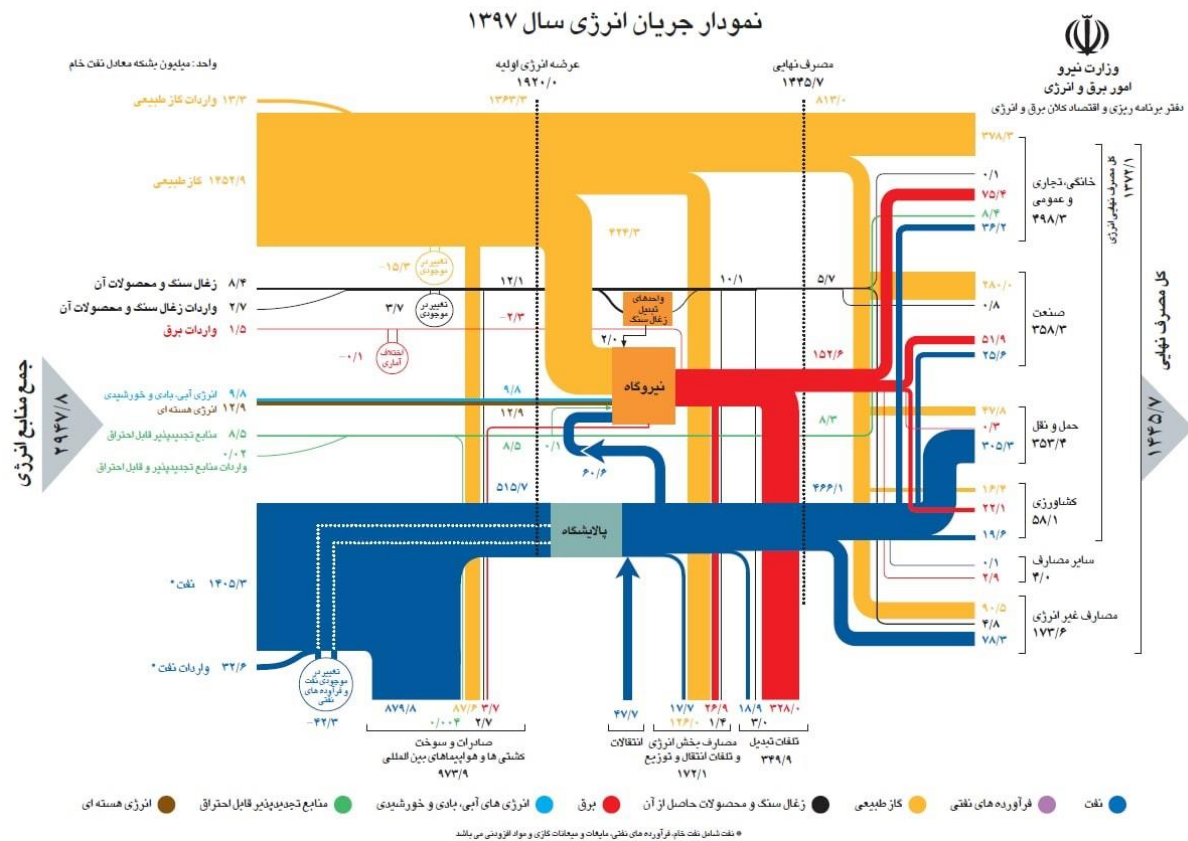
در ایران نیز، با استناد به نمودار جریان انرژی کشور ایران در سال ۱۳۹۷، کل مصرف نهایی انرژی کشور ۱۴۴۵/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام می‌باشد که ۴۹۸/۳ میلیون بشکه معادل نفت خام یا به‌عبارت‌دیگر ۳۵٪ از کل مصرف انرژی کشور به بخش خانگی و تجاری اختصاص دارد^[3]. شکل ۱ نمودار جریان کل انرژی مصرفی ایران در سال ۱۳۹۷ شمسی^[3] را نشان می‌دهد.

۲-۱- پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CHP)

مقالات مروری زیادی به بررسی مزایای این سیستم‌ها از جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی پرداخته‌اند^[4-6]. جیا و همکاران^[7] یک سیستم جدید مبتنی بر CCHP و سیکل رانکین ارگانیک و کلکتور خورشیدی را با سیستم CCHP معمولی از منظر ترموآکونومیک مقایسه و تحلیل نمودند. چو و همکاران^[8] ترکیب سیستم CHP با پمپ حرارتی هوا خنک به‌منظور تأمین گرمایش یک ساختمان کوچک را بررسی و شبیه‌سازی کردند. در پژوهش‌های داخل کشور نیز خسرو پور عربی و همکاران تأثیر به‌کارگیری چیلر جذبی در کنار CHP و بهینه‌سازی اجزای آن را مورد بررسی قرار دادند^[9].

۳-۱- پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ذخیره انرژی حرارتی یخ

در حوزه سرمایه‌ش، یکی از راهکارهای نوین در کاهش بار وارد بر چیلر در ساعات اوج مصرف و نیز کاهش ظرفیت چیلرها، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی یخ (ITES) می‌باشد. مزیت اصلی سیستم‌های ذخیره یخ این است که می‌توانند مصرف انرژی را از ساعات اوج بار به خارج از ساعات اوج بار منتقل کنند. همچنین در تعرفه‌های برق که بر اساس ساعت مصرف تنظیم می‌شوند، این سیستم‌ها می‌توانند یک رویکرد مهم در کاهش هزینه‌ها باشند. سپهری و نلسون^[10] با پیاده‌سازی یک سیستم ذخیره یخ در سه شهر غربی ایالات متحده، تأثیر دمای هوا و شدت تابش خورشید را بر عملکرد سیستم، بهره‌وری انرژی و ردپای کربن



شکل ۱) نمودار جریان انرژی کشور در سال ۱۳۹۷ [3]

اداری در شهر سان‌فرانسیسکو می‌باشد [17]. این ساختمان ۲۴ طبقه با مجموع مترهاژ بیش از ۲۴۰۰۰ مترمربع دارای بار سرمایشی ۶۱۰

تن تبرید در زمان اوج تقاضای بار است. این ساختمان مجهز به یک سیستم ذخیره یخ به ظرفیت ۱۹۲۰ تن-ساعت می‌باشد. چیلر مورد استفاده در ساختمان، دارای دو کمپرسور ۷۰ تن تبریدی که ۲۴ ساعته فعال هستند. به طوری که در هنگام شب، برودت مورد نیاز برای تولید یخ را فراهم می‌کنند و در طول روز، در کنار سیستم ذوب یخ‌های تهیه شده، به تأمین بخشی از بار برودتی که فراتر از ظرفیت سیستم انرژی حرارتی یخ است اختصاص می‌یابند.

۴-۱- پژوهش‌های انجام شده در زمینه استفاده از انرژی حرارتی خورشید در ساختمان

سیستم های مبتنی بر گرمایش خورشیدی سال هاست در پژوهش ها و کاربردهای گوناگون به کار می روند. صفحه های جمع آورنده حرارت خورشیدی عمدتا از نظر شکل ظاهری به گردآورنده های تخت و منحنی تقسیم می شوند. گردآورنده های صفحه تخت می توانند دارای روکش شیشه ای یا بدون شیشه باشند. کالینز [18] از گردآورنده های تخت بدون شیشه به عنوان راهکاری برای پیش گرم کردن هوای تهویه استفاده کرد. به عقیده ستینو و همکاران [19] گردآورنده های تخت دارای شیشه عمدتا برای کاربردهای گرمایش آب مصرفی گزینه مناسبی هستند. علاوه بر شکل ظاهری،

ارزیابی کردند. همچنین سنایی و همکاران [11] یک مدل بهینه سازی چندهدفه برای سیستم ذخیره یخ ارائه دادند که در آن بهره‌وری انرژی و هزینه‌های مالی به عنوان دو تابع هدف در نظر گرفته شدند. سونگ و همکاران [12] با بررسی راهکارهای مختلف در آرایش چیلرها و مخازن و استراتژی‌های کنترلی، روشی برای محاسبه ظرفیت بهینه سیستم ذخیره یخ و فاکتورهای مؤثر بر آن ارائه کردند. لین و همکاران [13] یک الگوریتم بهینه برای طراحی اجزای سیکل چیلر و ذخیره‌ساز یخ ارائه دادند که به کارگیری سیستم ذخیره یخ را به همراه یک چیلر مستقل و دو چیلر کمکی با سیستم لوله کشی اولیه/ثانویه امکان سنجی می‌کند.

همچنین، نتیجه‌گیری‌های مشابهی در پژوهش‌های جداگانه توسط لو و همکاران [14] و کاندندو و همکاران [15]، به منظور طراحی بهینه سیستم ذخیره‌ساز یخ در کنار چیلر حاصل شده است.

هاین و همکاران [16] یک سیستم تهویه مطبوع مرکزی مجهز به سیستم ذخیره انرژی حرارتی یخ را با کمک نرم افزار Openstudio شبیه سازی کردند که نتیجه آن، حدود ۳۲ تا ۳۶ درصد صرفه‌جویی در بار سرمایشی ساختمان مورد مطالعه بود. آنها همچنین آنالیز هزینه سیستم را بر اساس چند نوع تعرفه برق متفاوت انجام دادند. یکی از نمونه‌های موردی استفاده از سیستم ذخیره انرژی حرارتی یخ در ساختمان‌های بلندمرتبه، مربوط به ساختمان بلندمرتبه

دیوارهای خارجی این ساختمان $0.081 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ است. ضخامت این دیوارها مجموعاً حدود ۲۱ سانتیمتر است. همچنین بام این ساختمان که از نوع عرشه فولادی متشکل از لایه‌های قیرگونی و نازک‌کاری موزاییک است، دارای ضریب انتقال حرارت ساختمان، $0.0749 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ می‌باشد. ضخامت سقف حدود ۳۱ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

پنجره‌های به‌کاررفته در این پروژه از نوع دو جداره معمولی با پروفیل آلومینیوم متشکل از دو لایه شیشه به ضخامت ۴ میلیمتر و یک لایه هوای میانی به ضخامت ۶ میلیمتر می‌باشد. این پنجره‌ها به صورت تقریباً یکنواخت در هر چهار وجه شرق و غرب و شمال و جنوب ساختمان توزیع شده‌اند. ضریب انتقال حرارت این پنجره‌ها $3.146 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ محاسبه شده است. به طور کلی نرخ نفوذ هوا از پوسته ساختمان معادل یک بار تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شده است.

۲-۱-۳- کاربری ساختمان و بارهای داخلی

کاربری این ساختمان از نوع مسکونی با تراکم جمعیت 0.02 نفر به ازای هر مترمربع در نظر گرفته شده است. دمای تنظیم شده ترموستات‌های فضاهای داخلی در فصل تابستان 24 درجه سانتیگراد و در فصل زمستان 22 درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود.

لوازم الکتریکی مورد استفاده در ساختمان مطابق عرف ساختمان‌های مسکونی با چگالی توان 13 وات بر مترمربع مدل‌سازی شده است. همچنین چگالی توان سیستم روشنایی 4 وات بر مترمربع می‌باشد. ضمناً در این پروژه اجاق‌ها و تجهیزات

گردآورنده‌های خورشیدی را می‌توان از نظر سیال مورد استفاده بررسی کرد. پژوهش‌های زیادی در خصوص تأثیر سیال عامل مورد استفاده در عملکرد سیستم‌های گرمایش خورشیدی انجام شده است که مروری بر آن‌ها در مقاله‌ای توسط الشمانی و همکاران^[20] صورت گرفته است.

۲- روش اجرای تحقیق

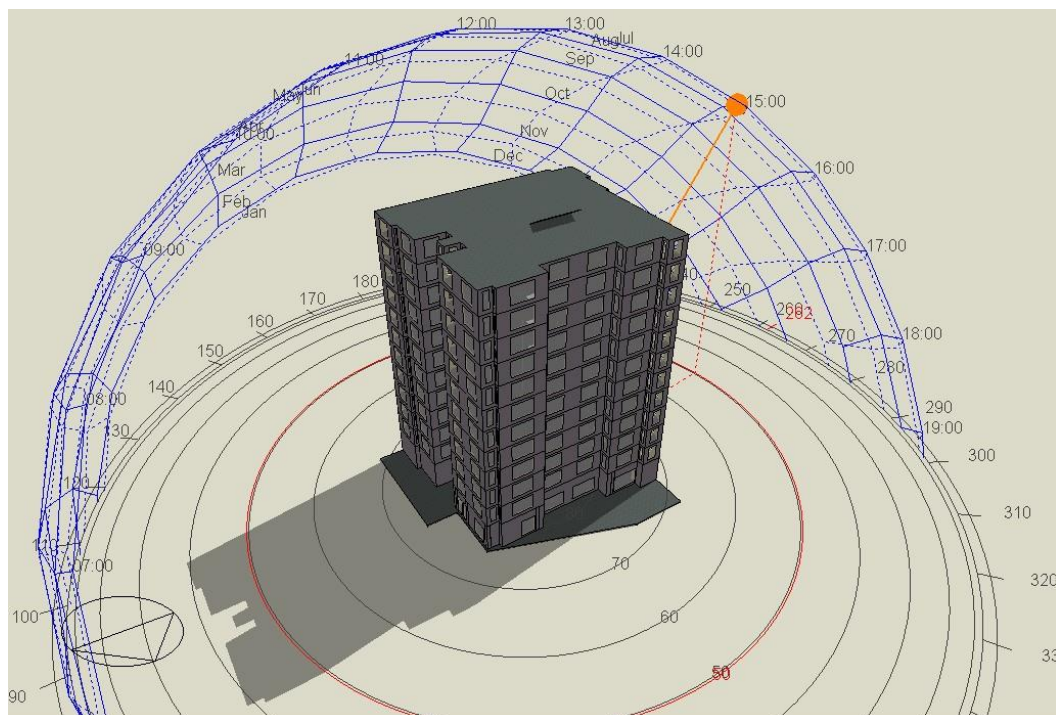
۲-۱- معرفی ساختمان مورد مطالعه

۲-۱-۱- مشخصات عمومی

به‌منظور ارزیابی قابلیت پیاده‌سازی و کاربرد سیستم پیشنهادی در یک ساختمان با مشخصات حقیقی، یک ساختمان در شهر تهران مورد مدل‌سازی قرار گرفت. بدیهی است که محاسبات و تعیین ظرفیت اجزای سیستم تهویه مطبوعی پیشنهادی، به بار حرارتی و برودتی که از مشخصه‌های این ساختمان می‌باشد، بستگی دارد. ساختمان مورد مطالعه در این پروژه، یک آپارتمان مسکونی با تعداد طبقات مجموعاً ۱۶ طبقه شامل ۴ طبقه پارکینگ، یک طبقه همکف و ۱۱ طبقه مسکونی در شمال شهر تهران می‌باشد. سازه این ساختمان از نوع اسکلت فولادی است. در شکل ۲ نمای بیرونی ساختمان مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار دیزاین بیلدر نمایش داده شده است.

۲-۱-۲- مشخصات مصالح و پوسته ساختمان

دیوارهای خارجی این ساختمان که تأثیر مهمی بر بار حرارتی و برودتی آن دارد، از جنس بلوک سبک لیکا، نمای سنگ تراورتن، و سطح داخلی گچ کاری شده می‌باشد. ضریب انتقال حرارت



شکل ۲) نمای بیرونی ساختمان مورد مطالعه

۲-۲-۲- شرایط اقلیمی شهر لس آنجلس

نمودارهای دمای هوا و شدت تابش خورشیدی برای شهر لس آنجلس در شکل ۵ و شکل ۶ نمایش داده شده است. این شهر نیز در پهنه بندی اقلیمی ASHRAE در منطقه اقلیمی B۳ قرار می‌گیرد [21].

۲-۳- معرفی سیستم و اجزای آن

سیستم تهویه مطبوع پیشنهادی در این تحقیق، یک سیستم متشکل از سه تکنولوژی گرمایش خورشیدی، تولید هم‌زمان برق و حرارت، و ذخیره انرژی حرارتی یخ است. در این سیستم یکپارچه، یک ژنراتور CHP در نظر گرفته شده که ضمن تولید برقی که به شبکه فروخته می‌شود، در فصل زمستان، حرارت موردنیاز سیستم گرمایش را تأمین می‌کند و در فصل تابستان، حرارت موردنیاز یکی

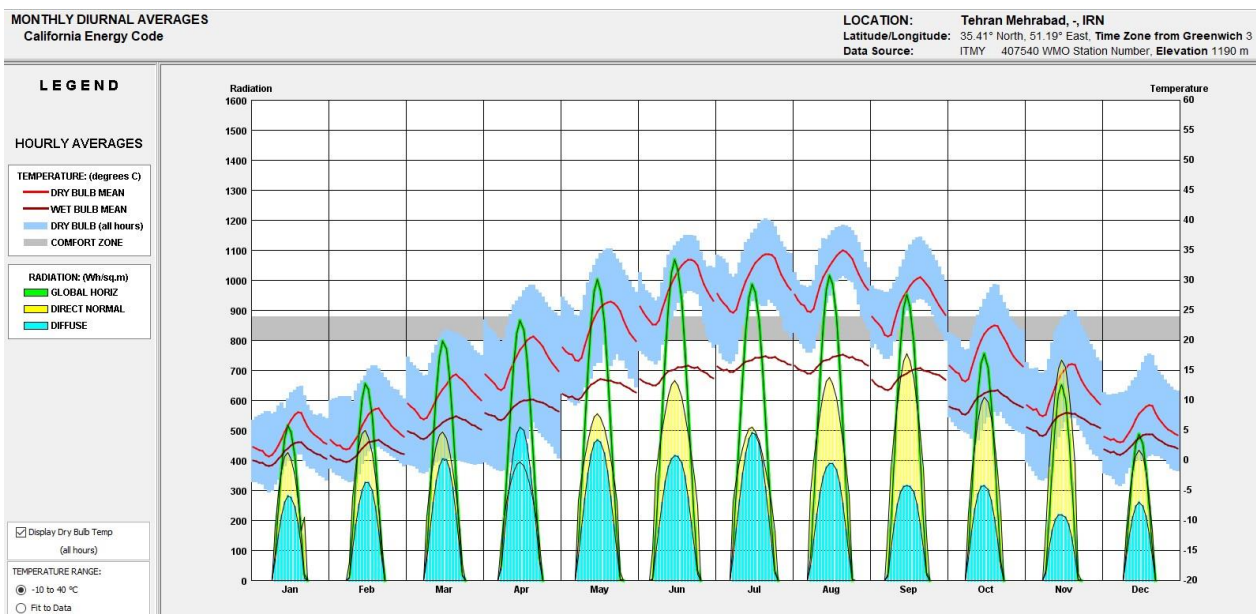
پخت‌وپز از نوع الکتریکی هستند و از گاز برای پخت‌وپز استفاده نمی‌شود. در نتیجه مصرف گاز صرفاً مختص نیازهای گرمایش می‌باشد.

۲-۲- آب و هوای شهرهای مورد مطالعه

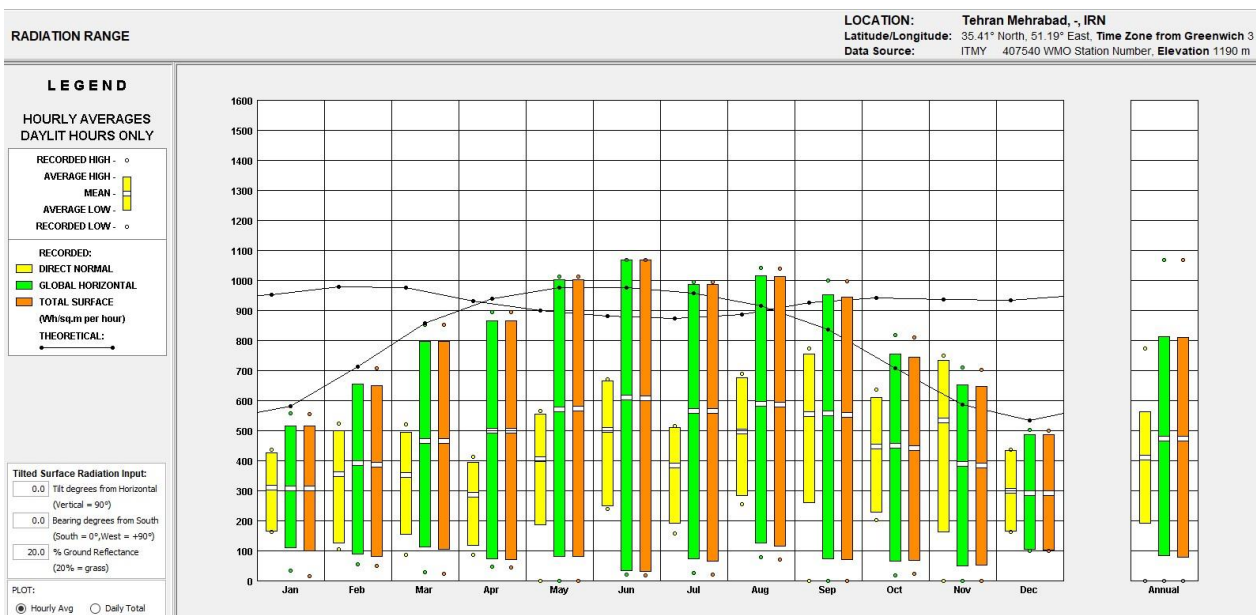
دو شهر تهران در ایران و لس آنجلس در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده آمریکا در این پژوهش بر اساس شرایط آب و هوایی و همچنین تعرفه‌های انرژی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۲-۱- شرایط اقلیمی تهران

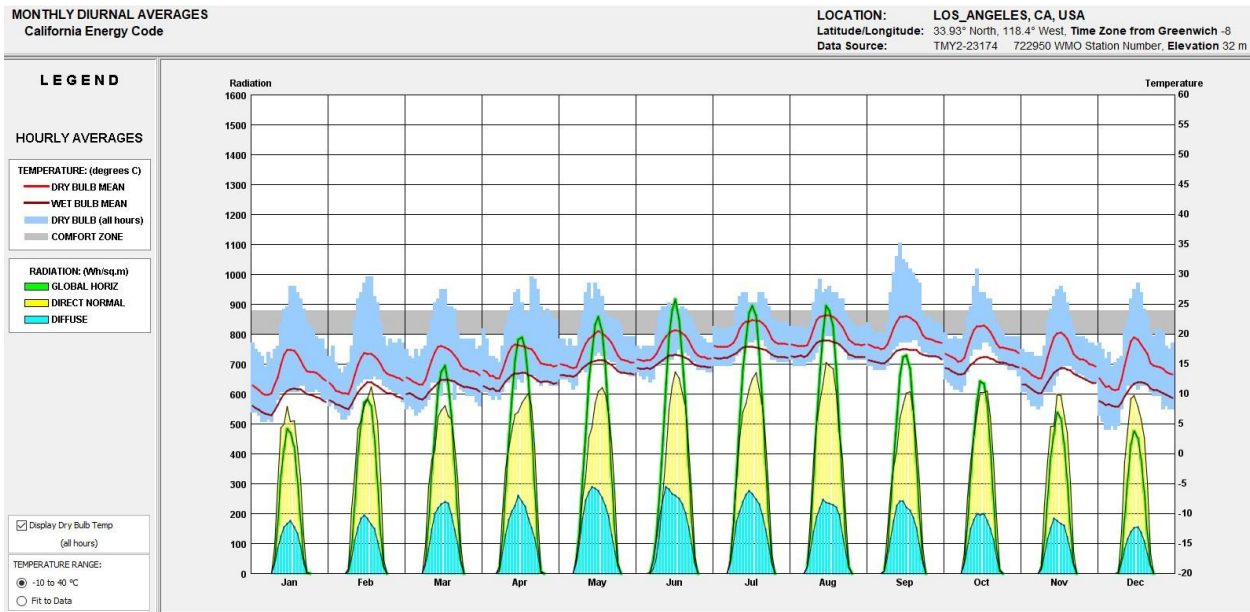
نمودارهای دمای هوا و شدت تابش خورشیدی برای شهر تهران در شکل ۳ و شکل ۴ نمایش داده شده است. تهران در پهنه بندی اقلیمی ASHRAE در منطقه اقلیمی B۳ قرار می‌گیرد [21].



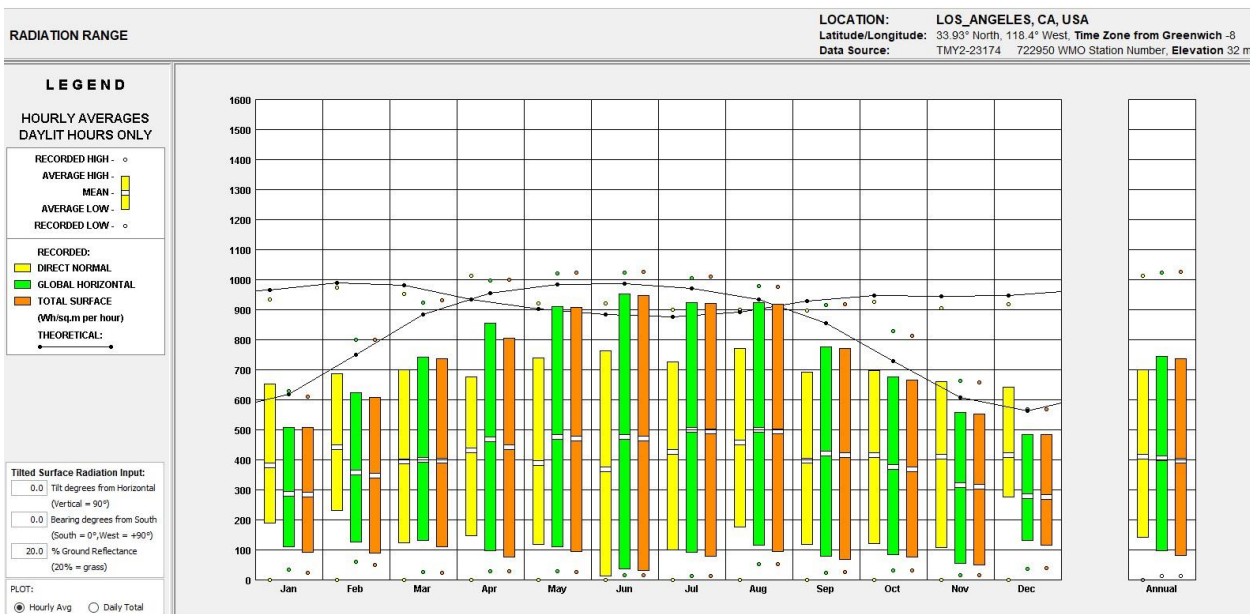
شکل ۳) نمودار ساعتی دمای شهر تهران در طول سال



شکل ۴) نمودار شدت تابش خورشیدی شهر تهران در طول سال



شکل ۵) نمودار ساعتی دمای شهر لس آنجلس در طول سال



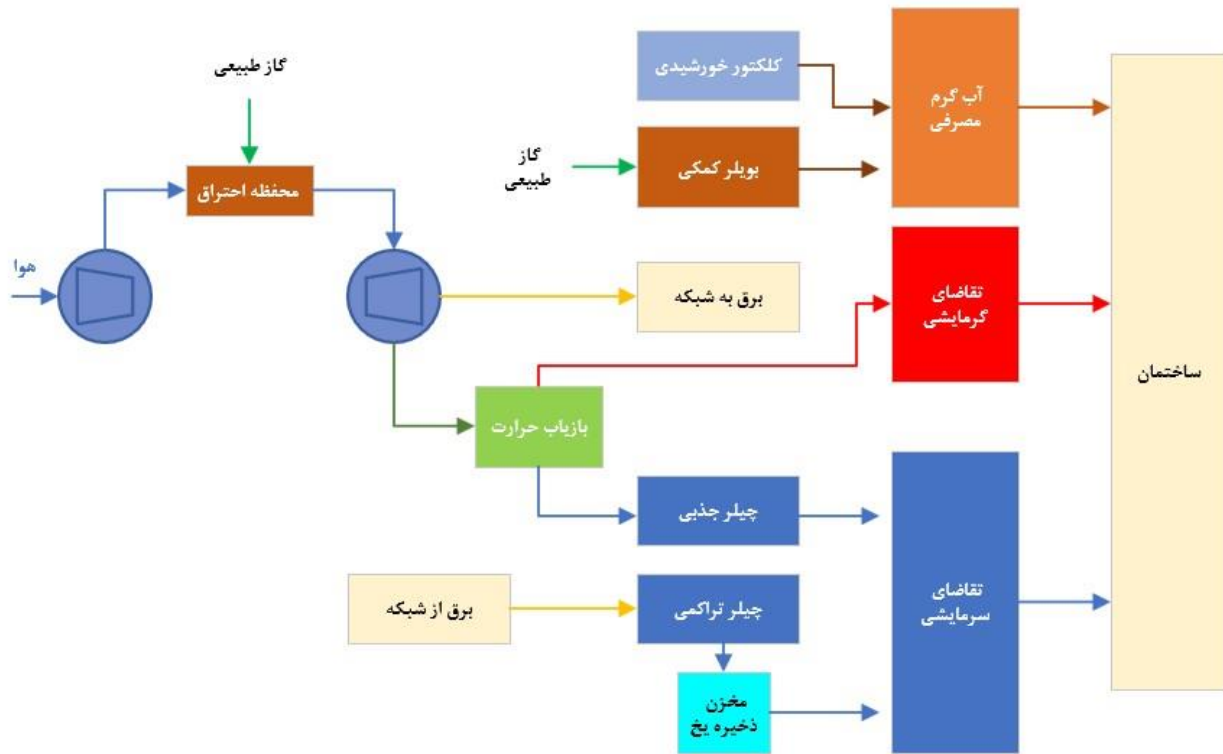
شکل ۶) نمودار شدت تابش خورشیدی شهر لس آنجلس در طول سال

۲-۳-۱- سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت

یک سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت CHP در فصل زمستان با اتصال به فن کویل ها، بارگرمایشی پروژه را تأمین می‌کند. در صورتی‌که بار تأمین شده توسط این سیستم کافی نباشد، یک بویلر کمکی وارد مدار شده و باقی مانده بار را تأمین می‌کند. در فصل تابستان نیز این سیستم حرارت موردنیاز چیلر جذبی را تأمین می‌کند.

به‌منظور تعیین ظرفیت حرارتی ژنراتور CHP، ابتدا باید میزان مصرف سوخت آن تعیین شود. مقدار سوخت مصرفی سیستم ژنراتور تابعی از بازدهی الکتریکی سیستم است که از معادله ۱ تعیین می‌شود [8].

سرمایش متشکل از دو چیلر (یکی جذبی و یکی تراکمی) و یک مخزن ذخیره یخ می‌باشد که چیلر تراکمی وظیفه شارژ مخزن یخ در طول شب را به عهده دارد و چیلر جذبی که پیش‌تر اشاره شد حرارت خود را از ژنراتور CHP می‌گیرد، در طول روز برای تأمین بار ورودی به مخزن ذخیره یخ کمک می‌کند. یک مجموعه کلکتور خورشیدی نیز در طول سال حرارت موردنیاز برای تأمین آب گرم مصرفی را تولید می‌کند و یک بویلر گازسوز کمکی برای پشتیبانی از این سیستم در زمانی که بار گرمایش خورشیدی کافی نباشد در نظر گرفته شده است. با توجه به اجزا و ماهیت این سیستم، نام اختصاری CCHP-ITES-S برای آن انتخاب شده است. در شکل ۷ دیاگرام کلی سیستم CCHP-ITESS نمایش داده شده است. از چیلرهای پروژه که از نوع جذبی می‌باشد تأمین می‌کند. سیستم



شکل ۷) دیاگرام کلی سیستم CCHP ITESS

$$Q = \frac{TH}{0.7 \times t_{ice} + t_{cooling}} \quad (۳)$$

در معادله فوق، Q ظرفیت موردنیاز چیلر بر حسب TH، kW مجموع بار برودتی در گرم‌ترین روز سال بر حسب t_{ice} ، kWh تعداد ساعاتی در شبانه‌روز که در مخزن یخ توسط چیلرها تولید (شارژ) می‌شود، و $t_{cooling}$ تعداد ساعاتی در شبانه‌روز است که سیستم ذخیره یخ باید سرمایه‌گذاری ساختمان را تأمین (دیسشارژ) کند. همچنین عدد ۰/۷ نشان‌دهنده ظرفیت نسبی چیلر در زمان تولید یخ است. انرژی ذخیره‌شده در مخزن یخ بر حسب kWh از معادله ۴ بدست می‌آید.

$$E_{storage} = \frac{Q}{t_{ice}} \quad (۴)$$

حجم مخزن ذخیره یخ از معادله ۵ حاصل می‌شود [23].

$$V_{storage} = \frac{E_{storage}}{\rho_{th,max}} \quad (۵)$$

در این معادله $V_{storage}$ حجم مخزن بر حسب متر مکعب و $\rho_{th,max}$ چگالی حرارتی بر حسب MJ/m^3 است که مقدار آن برای نوع مخازن ذوب داخلی و آرایش یخ روی کویل‌ها (Ice-on-coil) مقدار آن معادل $172/98 MJ/m^3$ است [23].

با توجه به ساختار و مشخصات چیلرهای تراکمی، این چیلرها برای شارژ و تولید یخ مناسب‌تر هستند. در این پروژه در کنار این چیلر تراکمی آب‌خنک، یک عدد چیلر جذبی نیز به کار گرفته شده است که آن بخش از بار برودتی که مخزن ذخیره یخ قادر به تأمین آن نیست را تأمین می‌کند. ژنراتور این چیلر جذبی حرارت موردنیاز خود را از سیستم CHP دریافت می‌کند.

$$F_{PGU} = \frac{E_{PGU}}{\eta_{PGU}} \quad (۱)$$

که در این رابطه η_{PGU} بازدهی موتور سیستم است. ظرفیت حرارت تولیدی سیستم ژنراتور نیز از طریق معادله ۲ به دست می‌آید.

$$Q_{PGU} = F_{PGU} \times (1 - \eta_{PGU}) \times \zeta \times \eta_{HRS} \quad (۲)$$

که در رابطه فوق Q_{PGU} حرارت تولیدی سیستم، η_{HRS} بازدهی حرارتی مبدل بازیافت حرارت و ζ ضریب اتلاف حرارت بین دودکش ژنراتور و مبدل بازیافت حرارت است.

۲-۳-۲- سیستم سرمایه‌گذاری

سیستم سرمایه‌گذاری این پروژه متشکل از سه جزء اصلی است که عبارتند از چیلر تراکمی، چیلر جذبی متصل به سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت (CCHP)، و سامانه مخزن ذخیره‌سازی انرژی حرارتی یخ.

برای تعیین ظرفیت تجهیزات مورد استفاده در این بخش نمودار ساعتی بار برودتی ساختمان در هر اقلیم موردنیاز می‌باشد که این بار برودتی پس از شبیه‌سازی ساختمان در نرم‌افزار دیزاین بیلدر به دست می‌آید. این پروفیل ساعتی در واقع نشان‌دهنده نیاز به سرمایه‌گذاری در گرم‌ترین روز سال در آب و هوای شهر محل مدل‌سازی است.

فرآیند طراحی در این سیستم به شرح زیر است. ابتدا بارهای برودتی ساعتی گرم‌ترین روز سال استخراج می‌شود. سپس برنامه زمان‌بندی عملکرد سیستم تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی حداقل ظرفیت تولید یخ از معادله ۳ استخراج می‌گردد [22].

۳-۳-۲- سیستم آب گرم خورشیدی

حرارت موردنیاز برای تأمین آب گرم مصرفی این ساختمان از طریق یک مجموعه کلکتور آب گرم خورشیدی واقع در بام ساختمان تأمین می‌شود. در روزهایی از سال که شرایط تابش خورشید برای تأمین این حرارت کافی نباشد، یک بویلر کمکی حرارت موردنیاز را تأمین می‌کند. مقدار حرارت جذب‌شده توسط خورشید در این سیستم با الگوریتم های نرم‌افزار دیزاین بیلدر محاسبه می‌گردد.

۴-۲- محاسبه انرژی مبدا

مطابق جدیدترین تعاریف سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا^[24]، صورت‌هایی از انرژی که در ساختمان به‌صورت الکتریسیته یا گاز یا سایر حامل‌های انرژی مصرف می‌شوند، انرژی سایت نام دارند. انرژی سایت به دو صورت می‌تواند به ساختمان ارائه شود. انرژی اولیه حالت خامی از انرژی است که برای تولید برق یا حرارت و... سوزانده می‌شود، مانند گاز طبیعی یا نفت. انرژی ثانویه محصول انرژی تولید شده از سوزاندن منابع انرژی اولیه است، مانند الکتریسیته خریداری شده از شبکه و یا حرارت دریافت شده از شبکه موتورخانه‌های بزرگ شهری. یک واحد انرژی اولیه و یک واحد انرژی ثانویه که در محل ساختمان مصرف می‌شوند به‌طور مستقیم قابل مقایسه با یکدیگر نیستند زیرا یکی از این دو نشان‌دهنده انرژی خام و دیگری نشان‌دهنده انرژی تبدیل شده می‌باشد. بنابراین، از آنجاکه حرارت و برق مصرفی ساختمان‌ها همواره در مسیر تولید و توزیع با اتلافاتی مواجه خواهد بود، می‌توان از مفهومی به نام انرژی مبدا استفاده نمود که نمایانگر مقادیر نیاز انرژی خام ساختمان با در نظرگیری اتلافات مربوطه است. در این پروژه به منظور برآورد تقریبی انرژی مبدا، از ضرایب تعیین شده توسط سازمان Energy Star استفاده می‌شود^[24]. این ضرایب که تابع محاسبات و اندازه‌گیری میانگین اتلافات تولید و توزیع حامل‌های انرژی هستند، البته برای کشور آمریکا تعیین شده‌اند و برای کشور ایران، چنین ضرایبی تا کنون رسماً ارائه نشده‌اند ولی در این تحقیق به منظور دستیابی به یک معیار مناسب برای سنجش انرژی مبدا، برای ایران نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۱۲، مقادیر ضرایب تبدیل انرژی سایت به انرژی مبدا برای انواع حامل‌های انرژی درج شده است.

با توجه به شکل فوق، پس از استخراج مصرف گاز و الکتریسیته خالص پروژه، می‌توان مقادیر انرژی مبدا را با معادله ۶ محاسبه نمود.

$$E_{source} = (E_{e,consumption} - E_{e,generation}) \times R_e + E_g \times R_g \quad (6)$$

که در معادله فوق $E_{e,consumption}$ برق مصرفی پروژه برحسب کیلووات ساعت، $E_{e,generation}$ برق تولیدی سیستم تولید همزمان برق و حرارت در محل پروژه که به شبکه فروخته می‌شود بر حسب کیلووات ساعت، R_e ضریب تبدیل الکتریسیته به انرژی مبدا مطابق جدول ۱، R_g ضریب تبدیل انرژی گاز طبیعی به انرژی مبدا

مطابق جدول ۱ و E_g انرژی گاز طبیعی مصرف شده در محل ساختمان برحسب کیلووات ساعت می‌باشد.

۵-۲- محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه

هزینه اولیه خرید تجهیزات، بسته به شرکت‌های سازنده و کیفیت محصولات، شامل گستره وسیعی می‌شود. در این تحقیق، توابع قیمت‌هایی که در جدول ۲ آمده‌اند بر اساس مقالات و پژوهش‌های پیشین که در زمینه تحلیل ترموایکونومیک این تجهیزات کار کرده‌اند تهیه شده است. لازم به ذکر است هزینه‌های محاسبه شده با این توابع شامل هزینه‌های خرید تجهیزات و نصب و راه‌اندازی می‌باشند.

به‌منظور تبدیل هزینه‌های اولیه به نرخ هزینه سرمایه‌گذاری با واحد US\$/s، می‌توان از معادله ۷ استفاده کرد.

$$Z_k = \frac{Z_k \times CRF \times \varphi}{N \times 3600} \quad (7)$$

در رابطه فوق، Z_k مجموع هزینه‌های اولیه تجهیزات است که از جدول ۱ به‌دست می‌آید، CRF فاکتور بازایافت سرمایه (Capital Recovery Factor)، φ ضریب هزینه تعمیرات و نگهداری و N تعداد ساعات عملکرد تجهیزات در طول یک سال است. فاکتور بازایافت سرمایه تابعی از نرخ تورم (i) و طول عمر تجهیزات (n) است که از معادله ۸ محاسبه می‌شود.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (8)$$

جدول ۱ ضرایب تبدیل انرژی سایت به انرژی مبدا^[24]

نوع انرژی	ضریب تبدیل
الکتریسیته (خرید از شبکه)	۲/۸۰
الکتریسیته (برق خورشیدی یا بادی در محل سایت)	۱/۰۰
گاز طبیعی	۱/۰۵
سوخت نفتی (شماره ۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶، دیزل، کروسین)	۱/۰۱
پروپان و پروپان مایع	۱/۰۱
بخار	۱/۲۰
آب گرم شهری	۱/۲۰
آب سرد شهری	۰/۹۱
چوب	۱/۰۰
ذغال سنگ	۱/۰۰
سایر	۱/۰۰

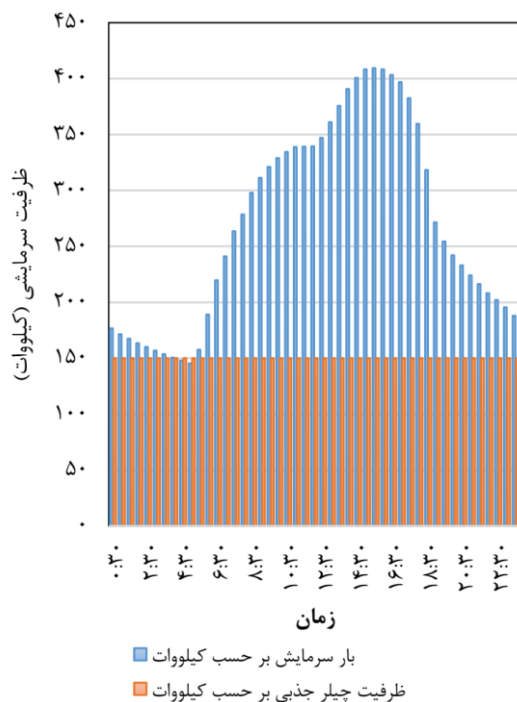
جدول ۲ هزینه اولیه تجهیزات

تجهیزات	تابع هزینه اولیه	مرجع
چیلر تراکمی	$Z_{Chiller} = 150.2 \times \dot{Q}_{Chiller}$	[24]
چیلر جذبی	$Z_{AbsChiller} = 454.34 \times \dot{Q}_{AbsorptionChiller}$	[25]
مخزن ذخیره یخ	$Z_{ST} = 8.67 \times 10^{(2.9211 \exp(0.1416 \times \log V_{ST}))}$	[26]
پمپ‌ها	$Z_{Pump} = 705.48 \times W_{Pump}^{0.71} \times \left(\frac{0.2}{1 - \eta_{Pump}} \right)$	[26]
ژنراتور CHP	$Z_{PGU} = 1376.64 \times \dot{W}_{PGU}$	[8]
بویلر گازسوز	$Z_b = 134 \times \dot{Q}_b$	[25]
کلکتور خورشیدی	$Z_{sc} = 235 \times A_{sc}$	[25]

آب و هوایی تهران محاسبه می‌شود و پروفیل ساعتی آن رسم می‌گردد.

با توجه به مقادیر بار برودتی و بر اساس معادله ۳ و معادله ۵ به این نتیجه می‌رسیم که مجموع ظرفیت مورد نیاز سیستم تبرید برای تولید یخ در شب و برای تأمین سرمایش کمکی در روز، ۲۹۵ کیلووات است. بنابراین یک چیلر تراکمی به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات و یک چیلر جذبی به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات انتخاب می‌کنیم. چیلر تراکمی همچنین برای شارژ مخزن ذخیره یخ و تولید یخ از ساعت ۲۳/۳۰ تا ۷/۳۰ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار یخ تولید شده باید به گونه‌ای باشد که از ساعت ۷/۳۰ تا ۲۳/۳۰ آن قسمت از بار سرمایشی که فراتر از ظرفیت چیلر جذبی می‌باشد را تأمین کند. حجم مخزن یخ بر اساس شکل ۱۰ برابر با ۳۴ متر مکعب می‌باشد. از نتایج به دست آمده این نتیجه حاصل می‌شود که مقدار انرژی که باید در هنگام شارژ شبانه مخزن یخ در آن ذخیره شود تا در طول روز کمبود ظرفیت چیلر جذبی را جبران کند، ۱۶۵۳ کیلووات ساعت است. بار گرمایش این ساختمان نیز در فصل زمستان ۵۶۴ کیلووات می‌باشد. در شکل ۸ بخشی از بار که توسط چیلر جذبی با ظرفیت ثابت تأمین می‌شود نمایش داده شده است. مازاد بار حرارتی که برای تأمین سرمایش ساختمان مورد نیاز است توسط انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن یخ تأمین می‌شود.

پس از شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی بر روی ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، نتایج سالانه مصرف انرژی در طول سال استخراج شد. مقایسه مصرف برق و گاز این سیستم با مصارف یک سیستم سنتی رایج (متشکل از چیلر تراکمی و بویلر گازسوز) نشان



شکل ۸) مقایسه ظرفیت ثابت چیلر جذبی نسبت به پروفایل رزوانه بار سرمایش

۶-۲- محاسبه دوره بازگشت سرمایه

در این تحقیق به منظور محاسبه دوره بازگشت سرمایه ساده (Simple payback period) سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم سنتی سرمایش و گرمایش مرکزی رایج از معادله ۹ استفاده می‌شود.^[8]

$$PB = \frac{Cost_{initial}}{Cost_{saving}} \quad (9)$$

در معادله فوق $Cost_{initial}$ برابر با اختلاف هزینه اولیه سیستم CCHP-ITESS با سیستم سنتی و $Cost_{saving}$ برابر با صرفه جویی حاصل از کاهش هزینه های برق و گاز مصرفی در سیستم CCHP-ITESS در مقایسه با هزینه برق و گاز سیستم سنتی است.

۷-۲- وضعیت تعرفه انرژی در شهرهای مورد مطالعه

ساختمان و سیستم مورد مطالعه در این پروژه در دو شهر تهران و لس آنجلس مدل سازی شده اند. با توجه به اسناد موجود تعرفه برق تهران^[27] روش زیر برای تعیین هزینه برق مورد استفاده قرار گرفته است. هزینه هر کیلووات ساعت برق ۱۳۱۰ ریال در نظر گرفته می‌شود. سپس در ساختمان‌های مجهز به کنتور دو یا سه زمانه، برای تشویق مشترکین به جابجایی مصرف از ساعات اوج بار، علاوه بر عدد محاسبه شده، به ازای هر کیلووات ساعت مصرف برق در ساعات اوج ۵۲۴ ریال به هزینه اضافه شده و به ازای هر ساعت مصرف در ساعات غیر اوج بار ۱۰۴/۸ ریال از هزینه محاسبه شده کم می‌شود. همچنین تعرفه گاز تهران به طور متوسط ۱۲۴۲ ریال به ازای هر متر مکعب گاز مصرفی در نظر گرفته شده است.

قیمت خرید تضمینی برق تولید شده توسط سیستم CHP بر اساس تعرفه دفتر برنامه ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی وزارت نیرو^[28]، ۴۰۸۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت برق وارد شده به شبکه در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر بر اساس دلار ۲۰ هزار تومانی در محاسبات مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

در ایالت کالیفرنیا که شهر لس آنجلس در آن قرار دارد تعرفه برق توسط شرکت های مختلف تأمین کننده متفاوت است. در این تحقیق تعرفه شرکت برق ادیسون کالیفرنیا جنوبی (South California Edison) ملاک عمل در نظر گرفته می‌شود^[29]. در این تعرفه هر کیلووات ساعت برق مصرفی در ساعات اوج (۴ تا ۹ بعد از ظهر) ۴۰ سنت و هر کیلووات ساعت برق مصرفی در سایر ساعات شبانه روز ۲۵ سنت در نظر گرفته می‌شود. تعرفه گاز برای لس آنجلس ۴ سنت به ازای هر کیلووات ساعت مصرف گاز در نظر گرفته شده است^[26]. همچنین نرخ خرید برق تولید شده توسط ژنراتور CHP، ۴۴ سنت در نظر گرفته شده است.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- بررسی نتایج شبیه‌سازی مصرف انرژی در شهر تهران

در اولین گام از فرایند مدل سازی ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، بار سرمایش در گرم ترین روز سال با توجه به شرایط

با در نظر گیری نرخ تورم ۴۱ درصد^[30]، ضریب تعمیرات و نگهداری ۱/۰۶، و طول عمر ۱۵ سال، مقدار CRF برای سیستم CCHP ITESS تعیین می‌شود که برابر با ۰/۴۱ خواهد بود. بنابراین نرخ هزینه سرمایه گذاری این سیستم برابر $0/00013562$ \$/s می‌شود.

لازم به ذکر است با توجه به قیمت های انرژی ایران و هزینه های اولیه، دوره بازگشت سرمایه این سیستم در تهران بیش از ۳۹ سال خواهد بود که نشان دهنده توجیه ناپذیری اقتصادی این سیستم در شرایط ایران است. در بخش های، همین سیستم در شهر لس آنجلس با در نظر گیری تعرفه های انرژی ایالت کالیفرنیا بررسی می‌شود تا تأثیر قیمت گذاری انرژی در توجیه پذیری سیستم ها ارزیابی شود.

۳-۴- شبیه سازی سیستم مورد مطالعه با اقلیم و تعرفه انرژی شهر لس آنجلس

به منظور ارزیابی تأثیر سیاست گذاری تعرفه انرژی بر توجیه پذیری سیستم های مورد مطالعه، مدل انرژی همان ساختمان مورد مطالعه، در شرایط آب و هوایی و تعرفه های انرژی شهر لس آنجلس در ایالت کالیفرنیا آمریکا، مورد شبیه سازی و تحلیل قرار گرفت.

با توجه به شباهت شرایط اقلیمی تهران و لس آنجلس نتایج این شبیه سازی نشان می‌دهد که مصارف انرژی در این دو شهر تا حد زیادی نزدیک به هم هستند. اما پارامترهای اقتصادی تفاوت های فاحشی باهم دارند که در بخش های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۵- مقایسه توجیه پذیری پیاده سازی سیستم در تهران و لس آنجلس

با توجه به تعرفه های برق و گاز و نیز توابع هزینه اولیه مذکور در بخش های پیشین پارامترهای اقتصادی این تحقیق برای شهر لس آنجلس به شرح زیر خواهند بود.

با در نظر گیری نرخ تورم ۲/۳ درصد، ضریب تعمیرات و نگهداری ۱/۰۶، و طول عمر ۱۵ سال، مقدار CRF برای سیستم CCHP ITESS تعیین می‌شود که برابر با ۰/۰۷۹ خواهد بود. بنابراین نرخ هزینه سرمایه گذاری این سیستم برابر $0/000074$ \$/s می‌شود.

دوره بازگشت سرمایه این سیستم با توجه به شرایط فوق در مقایسه با سیستم سنتی در شهر لس آنجلس ۳/۲۹ سال است که به مراتب پایین تر از این مقدار در تهران است. مقایسه هزینه های این سیستم در دو شهر تهران و لس آنجلس و همچنین مقایسه دوره بازگشت سرمایه سیستم پیشنهادی در این دو شهر در نمودار های شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

۳-۶- اعتبارسنجی نتایج

به منظور بررسی اعتبار نتایج، از مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج چو و همکاران^[8] استفاده شده است. ایشان به بررسی عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع مشابه متشکل از تولید همزمان برق و حرارت و برودت روی یک ساختمان نمونه در چند شهر از اقلیم

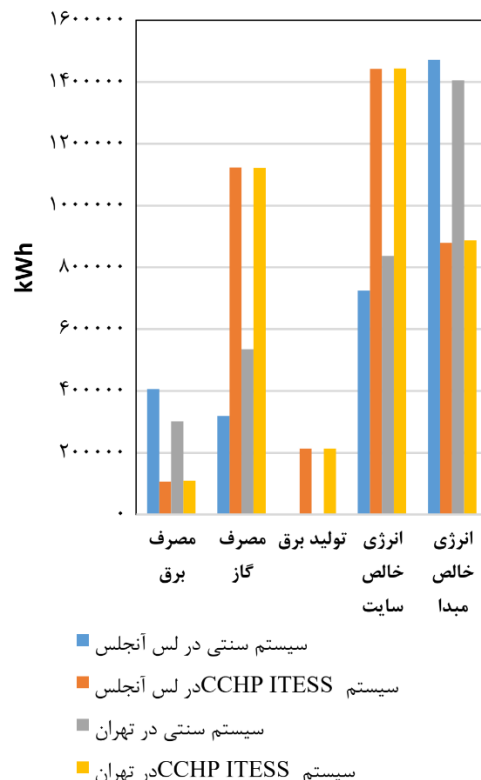
از کاهش ۶۳ درصدی مصرف برق و از طرف دیگر ۲ برابر شدن مصرف گاز می‌باشد که عمدتاً ناشی از به کارگیری سیستم CHP است. همچنین مقدار برق تولید شده در طول سال توسط ژنراتور CHP برابر با ۲۱۲۹۰۶ کیلووات ساعت است.

۳-۲- مقایسه مصرف انرژی سایت و مبدا در شهرهای مورد مطالعه

به منظور ارزیابی میزان تقاضای انرژی ساختمان با سیستم پیشنهادی و مقایسه عملکرد این سیستم در مقایسه با سیستم سنتی در شرایط آب و هوایی دو شهر مورد مطالعه، عملکرد این سیستم در هر دو شهر تهران و لس آنجلس مورد مدل سازی و تحلیل قرار گرفت. در این تحلیل، مقادیر انرژی برق مصرفی، برق تولیدی، گاز مصرفی، انرژی خالص سایت و انرژی خالص مبدا برای سیستم سنتی و جدید و همچنین برای هر دو شهر تهران و لس آنجلس مورد بررسی قرار گرفت. این مقایسه در نمودار شکل ۹ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر سه شهر با به کارگیری سیستم پیشنهادی CCHP-ITESS کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی خالص مبدا رخ می‌دهد هر چند بسته به اینکه بین برق و گاز کدام حامل انرژی بیشتر مصرف می‌شود، انرژی خالص سایت می‌تواند در مقایسه با سیستم سنتی کمتر یا بیشتر باشد.

۳-۳- محاسبه پارامترهای اقتصادی و بازگشت سرمایه

با توجه به تعرفه های برق و گاز و نیز توابع هزینه اولیه پارامترهای اقتصادی این تحقیق برای شهر تهران به شرح زیر خواهند بود.



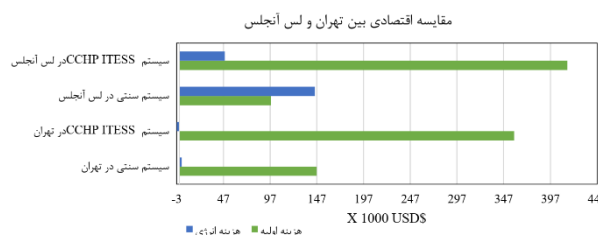
شکل ۹) مقایسه انرژی خالص سایت و مبدا در دو شهر تهران و لس آنجلس برای سیستم سنتی و جدید

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.
تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.
تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با اشخاص و سازمانهای دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.
منابع مالی: منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- 1- Park CE, Jeong SJ, Joshi M, Osborn TJ, Ho CH, Piao S, Chen D, Liu J, Yang H, Park H, Kim BM. Keeping global warming within 1.5 C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change*. 2018 ;8(1):70-4.
- 2- IEA. The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis [internet]. Available from: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/>. 2018.
- 3- Iran ministry of energy. Iran Energy Balance Sheet. 1397.
- 4- Wang J, Han Z, Guan Z. Hybrid solar-assisted combined cooling, heating, and power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;133:110256.
- 5- Hassan AA, Elwardany AE, Ookawara S, Ahmed M, El-Sharkawy II. Integrated adsorption-based multigeneration systems: A critical review and future trends. *International Journal of Refrigeration*. 2020;116:129-45.
- 6- Mahian O, Mirzaie MR, Kasaeian A, Mousavi SH. Exergy analysis in combined heat and power systems: a review. *Energy Conversion and Management*. 2020;226:113467.
- 7- Jia J, Chen H, Liu H, Ai T, Li H. Thermodynamic performance analyses for CCHP system coupled with organic Rankine cycle and solar thermal utilization under a novel operation strategy. *Energy Conversion and Management*. 2021;239:114212.
- 8- Cho H, Sarwar R, Mago PJ, Luck R. Design and feasibility study of combined heat and power systems integrated with heat pump. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:155-65.
- 9- KhosropoorArabi M. Performance Analysis of Indirect Absorption Chiller based on CHP System Components. *Chill Cool tower*. 1392.
- 10- Sepehri A, Nelson B. Energy and emissions analysis of ice thermal energy storage in the western US. *Energy and Buildings*. 2019;202:109393.
- 11- Sanaye S, Shirazi A. Four E analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage for air-conditioning applications. *International Journal of Refrigeration*. 2013;36(3):828-41.
- 12- Song X, Zhu T, Liu L, Cao Z. Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors. *Energy Conversion and Management*. 2018;164:288-300.
- 13- Lin WM, Tu CS, Tsai MT, Lo CC. Optimal energy reduction schedules for ice storage air-conditioning systems. *Energies*. 2015;8(9):10504-21.



شکل ۱۰ مقایسه هزینه‌های انرژی و هزینه‌های اولیه سیستم مدل‌سازی شده در تهران و لس آنجلس

های مختلف ایالات متحده آمریکا پرداختند و سپس مصرف انرژی نهایی و همچنین انرژی اولیه را بین سیستم سنتی و سیستم پیشنهادی ارزیابی و مقایسه کردند.

با مقایسه میان نتایج تحقیق حاضر با نتایج چو و همکاران [8] ملاحظه می‌شود که نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی مناسبی با نتایج تحقیق ایشان دارد. لازم به ذکر است در این مقایسه نتایج شهر لس آنجلس در تحقیق حاضر، با نتایج شهر آتلانتا در تحقیق چو و همکاران و به دلیل شباهت اقلیمی این دو شهر انجام شده است. همچنین ضرایب تبدیل انرژی ثانویه به اولیه برای برق ۲/۸۰ و برای گاز ۱/۰۵ در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم CCHP ITES بر روی یک ساختمان بلندمرتبه مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار گرفت. این سیستم متشکل است از یک دستگاه چیلر جذبی، یک چیلر تراکمی، یک مخزن ذخیره انرژی حرارتی یخ که توسط چیلر تراکمی شارژ می‌شود، یک دستگاه تولید همزمان برق و حرارت CHP که در فصل تابستان حرارت خود را به ژنراتور چیلر جذبی می‌دهد و در فصل زمستان مستقیماً حرارت مورد نیاز گرمایش را تأمین می‌کند و در طول سال برق تولیدی خود را به شبکه می‌فروشد. همچنین یک سیستم کلکتور آب گرم خورشیدی به همراه یک بویلر کمکی آب گرم مورد نیاز ساختمان را تأمین می‌کند. به کارگیری این سیستم در مقایسه با سیستم متداول چیلر و بویلر، در شهر تهران منجر به ۵۱۸۰۵۰ کیلووات ساعت و در شهر لس آنجلس منجر به ۵۹۲۶۸۰ کیلووات ساعت صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود. اما این کاهش مصرف انرژی و پیاده‌سازی این سیستم، تنها در شرایطی توجیه اقتصادی دارد که سیاست‌های قیمت‌گذاری انرژی، قیمت‌های واقعی و با حداقل یارانه بر روی حامل‌های انرژی تعیین‌کنند. همانطور که دیده شد، این سیستم در تهران و با قیمت‌های انرژی کشور ایران بازگشت سرمایه حدوداً ۳۹ ساله دارد. اما در کشور آمریکا و با قیمت‌های انرژی این کشور در مدت زمان نسبتاً کوتاهی، یعنی حدود ۳ سال، هزینه انجام شده را باز می‌گرداند. بنابراین اساساً این سیستم در شرایط اقتصادی فعلی کشور، نمی‌تواند دارای توجیه باشد اما از نگاه جهانی و با فرض به‌کارگیری این سیستم در کشورهای توسعه‌یافته، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف انرژی در صنعت ساختمان فراهم آورد.

- 22-Handbook AS. HVAC systems and equipment. chapter; 1996.
- 23-MacPhee D, Dincer I. Performance assessment of some ice TES systems. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009;48(12):2288-99.
- 24-Energy Star. Source Energy: Technical Reference [Internet]. 2019. Available from: [https://portfoliomanager.energystar.gov/pdf/reference/Source Energy.pdf?ccac-8037](https://portfoliomanager.energystar.gov/pdf/reference/Source%20Energy.pdf?ccac-8037)
- 25-New energy technologies, innovation and clean coal. 2020.
- 26-Sanaye S, Shirazi A. Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications. *Energy and Buildings*. 2013;60:100-9.
- 27-Iran Electricity Tariff [Internet]. 2018. Available from: https://www.theglobaleconomy.com/Iran/electricity_consumption/.
- 28-Office of Planning and Macroeconomics of Electricity and Energy of the Ministry of Energy. Iran CHP Power Feed-in Tariff [Internet]. 1398. Available from: <http://pep.moe.gov.ir/>.
- 29-SCE Electricity Tariff [Internet]. 2020. Available from: <https://www.sce.com/residential/rates/Time-Of-Use-Residential-Rate-Plans#>.
- 30-CBI. Central Bank of Iran: Inflation rate [Internet]. 2018. Available from: <https://www.cbi.ir/page/6251.aspx>
- 14-Luo N, Hong T, Li H, Jia R, Weng W. Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings. *Applied Energy*. 2017;204:459-75.
- 15-Candanedo JA, Dehkordi VR, Stylianou M. Model-based predictive control of an ice storage device in a building cooling system. *Applied Energy*. 2013;111:1032-45.
- 16-Heine K, Tabares-Velasco PC, Deru M. Energy and cost assessment of packaged ice energy storage implementations using OpenStudio Measures. *Energy and Buildings*. 2021;248:111189.
- 17-Akbari H, Sezgen O. Case studies of thermal energy storage (TES) systems: Evaluation and verification of system performance.
- 18-Collins MR, Abulkhair H. An evaluation of heat transfer and effectiveness for unglazed transpired solar air heaters. *Solar Energy*. 2014;99:231-45.
- 19-Settino J, Sant T, Micallef C, Farrugia M, Staines CS, Licari J, Micallef A. Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;90:892-909.
- 20-Al-Shamani AN, Yazdi MH, Alghoul MA, Abed AM, Ruslan MH, Mat S, Sopian K. Nanofluids for improved efficiency in cooling solar collectors—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:348-67.
- 21-Standard AS. Standard 169-2013. Climatic data for building design standards. 2013.