

The Feasibility Study of Employing an Ice Storage System in Air Conditioning Systems of Office Buildings in Warm Regions of Iran

Shahrokh Khaki Motnag¹, Mohammad Ahmadzadeh Talatapeh^{2*}

¹Department of Mechanical and Marine Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran
shahrokhkhakim@gmail.com

²Department of Mechanical and Marine Engineering, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran
m_ahmadzadeh56@yahoo.com

Keywords:

cooling load
energy consumption
air conditioning
ice storage
TRNSYS software

Abstract: Air conditioning systems account for a significant portion of electricity consumption in buildings. Therefore, the use of new technologies to reduce electricity consumption is essential for engineers and researchers. In this research, an ice storage system in combination with the air conditioning system of an office building has been investigated to reduce the electrical energy consumption of the air conditioning system. For this purpose, a building in Chabahar-Iran (as a region with a high cooling load required region) is considered. The building is simulated in TRNSYS software at the existing condition as well as with the added ice storage system to predict the performance of the systems. The study shows that ice storage system is more efficient in the partial load strategy than other examined strategies. It was also found that by using an ice storage system the total electricity consumption could be reduced about 37.89%, and the new system was able to transfer 37.9% of energy consumption from peak load hours to medium and low load hours. Economically, it is proved that by employing the ice storage system in the partial load strategy, a significant amount of reduction in electricity bill, about 62%, can be achieved.

Original Research Article

Paper History:

Received: 18/10/2022

Accepted: 17/1/2023

How to cite this article: Khaki Motnag, Sh., Ahmadzadeh Talatapeh, M., "The Feasibility Study of Employing an Ice Storage System in Air Conditioning Systems of Office Buildings In Warm Regions of Iran", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 98-111, 2023. <https://doi.org/10.22052/JEEM.2023.113713>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

The need for energy is one of the most important human concerns today. Energy demand, global warming, ozone depletion, and environmental pollution have led to a demand for the appearance of clean alternative energy sources. Since the fossil fuels such as coal, oil, and natural gas are exhaustible and highly polluting, shifting to clean energy resources is essential. In building sector, air conditioning systems account for a significant portion of electricity

consumption. Therefore, benefiting from new technologies to reduce electricity consumption has been attracted by the air conditioning engineers for domestic and industrial ventilation applications. In this research, application of an ice storage system in combination with the air conditioning system of an office building was explored to reduce the electrical energy consumption of an air conditioning system. However, employing an ice storage system for space cooling purposes has not been considered

in Iran so far. Moreover, the literature survey indicates that research studies employing the Typical Meteorological Year (TMY) weather file to determine the hour-by-hour performance of the so-called ice storage system are very limited and acutely none. To this end, this study has been conducted; the major aim is to explore the possibility of employing a combination of ice storage system and the cooling systems of the buildings for southeast-Iran climate condition. This research study has been conducted to determine the new recommended cooling system on the established indoor air conditions and power consumption. An office building in Chabahar, Iran (southeast of the country) is considered for this study. The southeast region of the country is a region with considerable cooling load demands.

Materials and Methods

As explained earlier, a building in Chabahar-Iran was considered for the study. For this purpose, the building was simulated in TRNSYS software at the existing condition as well as with an added ice storage system. TRNSYS software made it possible to predict the performance of the systems for a whole year of operation.

The considered building was an administration building with an area of over 1000 m². The building consisted of three floors with 51 rooms. Three Air Handling Units (AHU), as air conditioning systems, provided conditioned air into the floors. The ground floor consisted of 8 rooms with a height of 5.04 m. The first and the second floors had the same plan, a space of 1263 m² with 22 rooms.

As explained above, TRNSYS software, as a program to simulate the transient behavior of the thermal energy systems, was used to evaluate the performance of the system. The software library

included standard equipment which represented system's components; however, the software enabled users to define and add non-standard equipment to the library as a new component. In this research, hour-by-hour performance values were obtained by the dynamic simulation of the considered building under the climate conditions of the region. For this purpose, TMY data, as a set of hour-by-hour meteorological values for a period of 1 year, was used.

For instance, in simulation of the exiting situation process, the AHUs were different in capacity and air flow rates, namely AHU-700, AHU-1000 and AHU-1300. Therefore, in order to simulate the AHUs in the TRNSYS studio, the performance characteristic curves were derived by data collection process and by supplier's provided data. The performance characteristic equations were derived from the performance characteristic curves and the performance of the AHUs were written using FORTRAN source code to represent the AHUs mathematically in the TRNSYS studio as a component.

Results and Conclusion

The study showed that ice storage systems were more efficient in the partial load strategy than the other examined strategies. It was also found that by using the ice storage system the total electricity consumption could be reduced about 37.89%. It was also shown that the new system was able to transfer 37.9% of energy consumption from peak load hours to medium and low load hours. Economically, it was proved that by using an ice storage system in the partial load strategy, a significant amount of reduction in electricity bill, about 62%, could be achieved.

امکان‌سنجی استفاده از سیستم ذخیره یخ در سیستم‌های تهویه مطبوع ساختمان‌های اداری در مناطق گرمسیر ایران

شاهرخ خاکی منتق^۱، محمد احمدزاده طلائی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

shahrokhkhakim@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک و مهندسی کشتی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران

m_ahmadzadeh56@yahoo.com

واژه‌های کلیدی:

بار سرمایشی

مصرف انرژی

تهویه مطبوع

ذخیره یخ

TRNSYS

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده: سیستم‌های تهویه مطبوع در ایران بخش قابل توجهی از مصرف برق در ساختمان‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین استفاده از فناوری‌های نوین برای کاهش مصرف برق به‌خصوص در مناطق گرمسیر جنوب کشور یک امر ضروری برای مهندسان و محققان است. در این تحقیق، ترکیب سیستم ذخیره یخ با سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان به‌منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، یک ساختمان اداری در چابهار- ایران (منطقه‌ای با بار سرمایشی زیاد) برای تحقیق در نظر گرفته شده و در شرایط موجود و سیستم ذخیره یخ افزوده‌شده در محیط نرم‌افزار TRNSYS شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعه نشان می‌دهد که سیستم ذخیره یخ در عملکرد با استراتژی بار جزئی، کارآمدتر از سایر استراتژی‌های عملکردی است. همچنین مشخص شد که به‌کارگیری سیستم ذخیره یخ ۳۷/۸۹٪ از کل برق مصرفی سیستم تهویه مطبوع را کاهش داده و این سیستم توانایی انتقال ۳۷/۹٪ از انرژی مصرفی از ساعت‌های پیک بار به ساعت‌های کم‌بار و متوسط‌بار را دارد. از لحاظ اقتصادی نیز مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار جزئی، در حدود ۶۲٪ به‌طور میانگین در هزینه‌های برق کاهش به عمل می‌آید.

۱. مقدمه

در مناطق گرمسیر جنوب ایران دستیابی به یک فضای مطبوع از لحاظ دمایی و رطوبتی همراه با مصرف انرژی مناسب به‌عنوان یک هدف مهم برای طراحان سیستم‌های تهویه مطبوع تلقی می‌گردد. جنوب ایران را می‌توان به دو دسته گرم و خشک و گرم و مرطوب گرمسیری تقسیم‌بندی نمود که از جمله شهرهای گرم و نسبتاً مرطوب، می‌توان به شهرستان چابهار با میانگین دمای ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد در ماه‌های گرم سال اشاره کرد [۱].

در حالت کلی برای ایجاد یک فضای مطبوع برای ساکنان یک ساختمان، بهترین حالت دمایی و رطوبتی به‌ترتیب ۲۲/۵ تا ۲۵/۵ درجه سانتی‌گراد و ۴۰ تا ۶۰٪ رطوبت نسبی توسط سازمان استاندارد جهانی اشری^۱ توصیه شده است [۲]. مطالعات متعددی درخصوص به‌کارگیری روش‌های نوین و کاربردی از جمله سیستم‌های ذخیره یخ^۲ در ساختمان‌ها به‌منظور مدیریت و کاهش مصرف انرژی سیستم‌های تهویه مطبوع گزارش شده است [۳-۱۸]. به‌طور نمونه مطالعه‌ای در زمینه تأثیر به‌کارگیری سیستم ذخیره یخ به‌صورت ترکیبی با سیستم تهویه مطبوع^۳ در میزان هزینه برق مصرفی یک هایپرمارکت مورد بررسی قرار گرفته است [۳]. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سیستم ذخیره یخ، قابلیت ذخیره ۴۷٪ بار سرمایشی را به‌صورت روزانه، و قابلیت فراهم آوردن بار سرمایشی در اوج بار مصرفی را داراست. این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم سرمایه اولیه را در مدت ۳ سال کاری برگشت می‌دهد. در تحقیق دیگری، سیستم ذخیره یخ با پنل‌های فتوولتائیک مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق، ضریب عملکرد در حالت استفاده از پنل‌های خورشیدی در سیستم سرمایش بر پایه سیستم ذخیره یخ بین ۰/۱۹ و ۱/۳۳ گزارش شد. نتایج این تحقیق عملکرد مثبت استفاده از این سیستم را نشان می‌دهد [۵]. امکان ترکیب یک سیستم سرمایشی خورشیدی با سیستم ذخیره یخ به‌منظور سرمایش یک ساختمان اداری واقع در ابوظبی و یک ساختمان مسکونی واقع در دبی مطالعه گردید [۷]. در این تحقیق، سیستم پیشنهادشده از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد با به‌کارگیری سیستم ترکیبی پیشنهادی به‌میزان ۳۸٪ در مصرف انرژی سالانه در مقایسه با سیستم متداول صرفه‌جویی به عمل آمده و به‌مقدار قابل توجهی در آلاینده

دی‌اکسید کربن کاهش داده می‌شود. به‌علاوه نتایج تحقیق نشان می‌دهد که دوره بازگشت سرمایه سیستم پیشنهادی در ساختمان‌های اداری ۸/۸ و در ساختمان‌های مسکونی ۷/۸ سال می‌باشد [۷]. تأثیر شرایط آب‌وهوایی مختلف بر امکان‌سنجی اقتصادی سیستم ذخیره یخ در یک ساختمان اداری توسط رهگذر و همکاران [۸] مورد مطالعه قرار گرفت. وابستگی زیاد دوره بازگشت سرمایه سیستم ذخیره‌سازی یخ به شرایط آب‌وهوایی، نحوه ذخیره‌سازی و هزینه برق در این تحقیق گزارش گردید. در گزارش دیگری به‌کارگیری سیستم تهویه مطبوع به‌همراه سیستم ذخیره یخ خورشیدی برای دو آب‌وهوای گرم و مرطوب و گرم و خشک در مصر مطالعه شده است [۱۰]. در این مطالعه به‌کارگیری این سیستم از نظر اقتصادی و انرژی بررسی و تأثیر مثبت سیستم در میزان صرفه‌جویی اقتصادی و میزان کاهش آلاینده دی‌اکسید کربن ارائه شده است. در همین راستا راهدار و همکاران [۱۱] کاهش میزان آلاینده‌گی محیط با استفاده از سیستم ذخیره‌سازی یخ و مواد تغییر فازدهنده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم‌های مورد مطالعه، توانایی کاهش انتشار گاز دی‌اکسید کربن به‌ترتیب به‌میزان ۱۷/۸ و ۲۷/۲٪ را نسبت به حالت متعارف دارند. در مطالعه دیگری در ایران، ارزیابی اقتصادی و فنی سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما توسط حسن عسگری و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که سیستم ذخیره‌سازی سرما در حالت کامل ۱۶ ساعته مقرون‌به‌صرفه بوده و دوره بازگشت سرمایه آن ۲/۳ سال است.

در به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره یخ استراتژی‌های مختلفی ارائه شده است. به‌طور نمونه سنایی و همکاران [۱۸] تحقیقاتی را در زمینه استفاده از سیستم مذکور در استراتژی بار کامل و جزئی انجام دادند. با توجه به نتایج ارائه‌شده، این سیستم قادر است تا به‌ترتیب ۱۱/۸۳ و ۱۰/۲۳٪ انرژی الکتریکی مصرفی را نسبت به وضعیت موجود کاهش دهد.

مرور بر کارهای انجام‌شده قبلی نشان می‌دهد به‌رغم گزارش کارهای قابل توجه و ارزشمند درخصوص موضوع، مطالعه‌ای بر روی امکان به‌کارگیری سیستم سردسازی ذخیره یخ به‌همراه سیستم تهویه مطبوع ساختمان‌های اداری برای منطقه جنوب شرق ایران گزارش نشده است. به‌علاوه عملکرد سیستم پیشنهادی در تحقیق حاضر، به‌صورت وابسته به زمان و به‌صورت ساعت‌به‌ساعت برای کل یک سال عملکردی برای منطقه مذکور ارزیابی می‌شود. به این منظور در این مطالعه، یک ساختمان اداری واقع در منطقه جنوب

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)
2. Ice Thermal Storage
3. Heating, Ventilation and Air Conditioning

که برای تحلیل عملکرد سیستم‌های انرژی و حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰]. این نرم‌افزار با استفاده از هسته قوی و انعطاف‌پذیر می‌تواند برای مدل‌سازی اکثر سیستم‌های انرژی و متغیر با زمان مورد استفاده قرار بگیرد. این نرم‌افزار دارای کتابخانه‌ای حاوی تجهیزات (کامپوننت) متداول است که هر یک از آن‌ها عملکرد یک سیستم واقعی را مدل‌سازی می‌نماید. این نرم‌افزار این امکان را برای کاربر فراهم می‌نماید تا با استفاده از تجهیزات (کامپوننت)‌های موجود و تعریف‌شده در کتابخانه نرم‌افزار، سیستم مورد مطالعه خود را تحلیل و بررسی نماید. در این مطالعه از TRNSYS16 استفاده شده است.

۴. سیستم ذخیره یخ

با توجه به اینکه تعرفه‌های مصرف انرژی الکتریکی در ساعات مختلف یک شبانه‌روز با هم متفاوت بوده و همچنین در ساعات اوج بار، استفاده بیشتر از انرژی برق باعث افزایش هرچه بیشتر مصرف سوخت‌های فسیلی و در نتیجه باعث آلودگی مضاعف می‌شود، استفاده از سیستم ذخیره یخ یک جایگزین مناسب برای انتقال بار الکتریکی مصرفی از ساعات اوج بار به ساعات کم‌بار است. در حالت کلی، این سیستم ما را قادر می‌سازد تا در ساعات کم‌بار با استفاده از تجهیزات برودتی، یخ مورد نیاز را تولید و ذخیره نموده و در ساعات اوج بار از یخ ذخیره‌شده برای تأمین بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان استفاده کنیم [۲۱-۲۳].

در این تحقیق تأمین بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان با استفاده از یخ تولیدشده در طی سه استراتژی مختلف عملکردی شامل بار کامل، بار جزئی تقاضا و بار جزئی محدود، مطالعه و بررسی شده است.

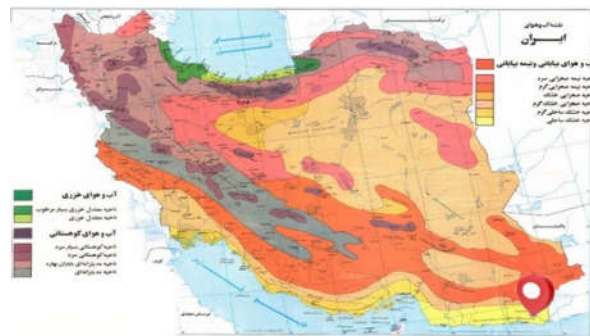
۱.۴ بار کامل

عملکرد سیستم در استراتژی بار کامل بدین صورت است که در ساعات غیراداری و کم‌بار با تغییر مسیر مبرد چیلر سیستم تهویه مطبوع از دستگاه‌های هواساز به مخزن ذخیره یخ، به تولید و ذخیره یخ در مخازن دارای مبدل حرارتی پرداخته می‌شود. سپس از انرژی سرمایشی موجود در یخ تولید و ذخیره‌شده، بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان در ساعات میان‌بار و اوج‌بار تأمین می‌شود. با این استراتژی می‌توان انرژی الکتریکی مصرفی توسط سیستم تهویه مطبوع در ساعات مذکور را به ساعات کم‌بار انتقال داد. شکل (۳) طرح‌واره سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف عملکردی را نشان می‌دهد [۱۸].

شرق ایران انتخاب و تأثیر به‌کارگیری سیستم ذخیره یخ به‌همراه سیستم تهویه موجود ساختمان بر روی شرایط هوای فراهم‌شده و کاهش انرژی مصرفی، به‌صورت ساعتی و برای کل سال مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

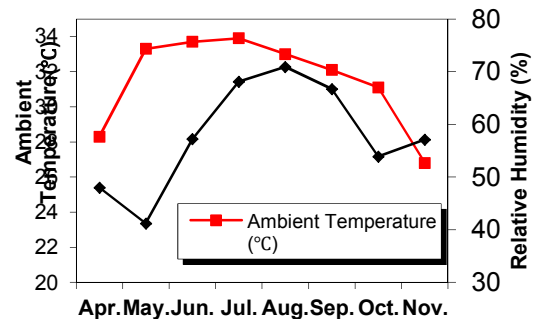
۲. اقلیم چابهار

شهرستان چابهار از شهرهای استان سیستان و بلوچستان، به‌وسعت ۹۷۳۹ کیلومترمربع در منتهی‌الیه جنوب شرقی ایران و در کنار دریای عمان واقع شده است. این شهرستان از شمال به شهرستان‌های ایرانشهر و نیک‌شهر، از جنوب به دریای عمان، از شرق به پاکستان و از غرب به استان هرمزگان محدود می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱): مناطق مختلف جغرافیایی ایران از نظر آب‌وهوایی (چابهار واقع در جنوب شرق ایران) [۱۹]

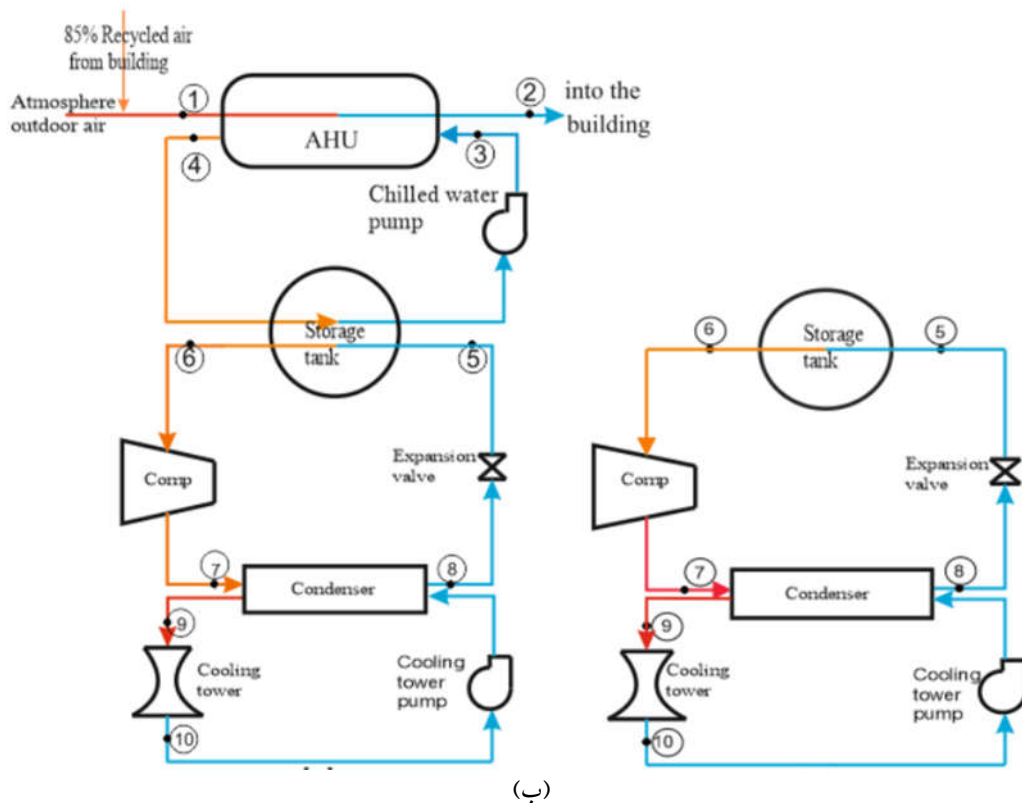
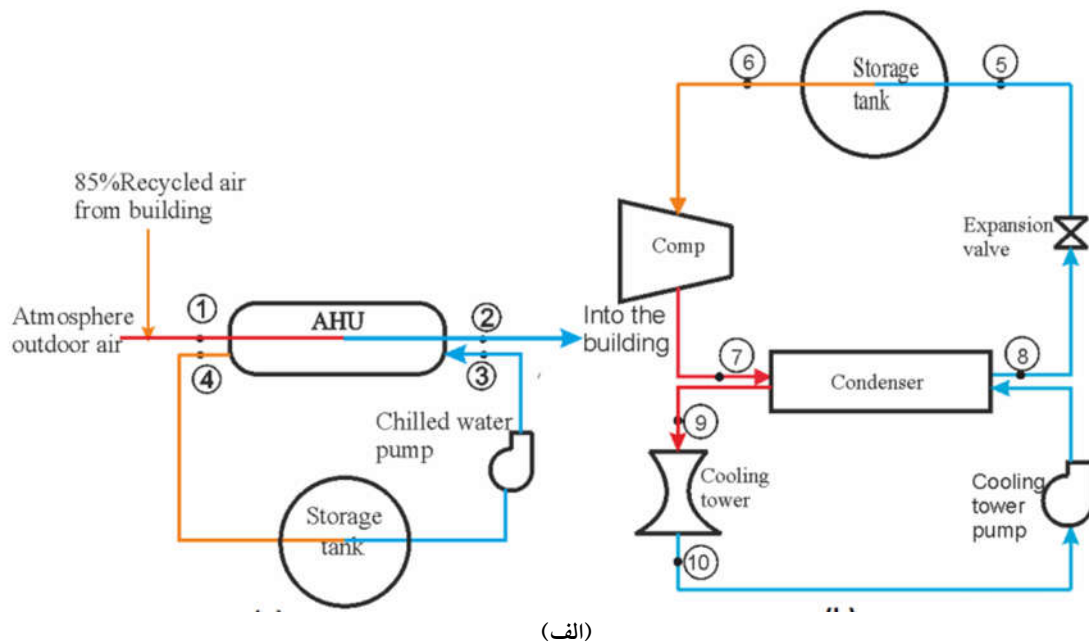
تغییرات دمایی و رطوبتی شهرستان چابهار در ماه‌های گرم سال در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، این شهرستان در منطقه گرم و نسبتاً مرطوب قرار گرفته و میانگین سالیانه دما و رطوبت در این شهرستان به ترتیب ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد و ۵۷/۴ درصد است [۲۰]. لذا این منطقه به‌عنوان منطقه‌ای با بار سرمایشی مورد نیاز قابل توجه تلقی می‌گردد.



شکل (۲): میانگین ماهیانه دما و رطوبت نسبی شهرستان چابهار در ماه‌های گرم سال [۲۰]

۳. نرم‌افزار TRNSYS

نرم‌افزار TRNSYS یک نرم‌افزار کاربردی در علم مهندسی است



شکل (۳): طرح‌واره استراتژی عملکردی سیستم ذخیره یخ در سیکل شارژ و دشارژ: (الف) بار کامل، (ب) بار جزئی

مورد استفاده در استراتژی بار کامل است که این استراتژی نیز خود شامل دو حالت می‌شود [۱۸ و ۲۲]:

الف. بار جزئی تقاضا

در این حالت، سیستم فقط در زمان‌های اوج بار که تقاضا برای انرژی الکتریکی به اوج خود می‌رسد عمل می‌کند و باعث انتقال

۲.۴. بار جزئی

در عملکرد بار جزئی، یخ ذخیره‌شده در ساعات کم‌باری در ترکیب با سیستم تهویه مطبوع موجود در ساختمان در ساعات اوج بار و میان‌بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این استراتژی، کاهش ظرفیت سیستم تبرید و اندازه مخازن ذخیره یخ نسبت به تجهیزات

ذخیره‌سازی می‌باشد که هم به‌صورت تجربی و هم به‌صورت ریاضی قابل محاسبه است. رابطه ریاضی زیر به این منظور تعریف شده است [۱۸ و ۲۴].

$$\eta_{ST} = 1 - \left(\frac{Q_{l, ch} + Q_{l, dc}}{Q_{ST}} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، $Q_{l, ch}$ میزان تلفات گرما از خطوط لوله متصل به مخزن و تلفات حرارتی محیطی مخزن در زمان تولید یخ برحسب (kJ/hr) و $Q_{l, dc}$ نیز میزان تلفات حرارتی در فرایند ذوب یخ است. حجم مخزن ذخیره باید دارای ظرفیت ذخیره یخ تولیدشده برای استفاده در استراتژی‌های ذکرشده و همچنین انبساط ناشی از هوای محبوس در داخل یخ را داشته باشد. بدین منظور برای محاسبه حجم مخزن ذخیره یخ و همچنین حجم یخ مورد نیاز، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۲۵].

$$V_{ST} = (Q_{ST} \times 3600) \times \left[\frac{1}{\rho_w C_{p, w} (T_{dc} - T_{FP, w})} + \frac{1}{\rho_w i_{ph}} \dots \right] + \frac{1}{\rho_{ice} C_{p, ice} (T_{FP, w} - T_{ST})} \quad (3)$$

که در آن، V_{ST} حجم مخزن ذخیره یخ، ρ_w چگالی آب، $C_{p, w}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب در فشار ثابت، T_{dc} دمای سیال خروجی و $T_{FP, w}$ دمای انجماد سیال برحسب درجه سانتی‌گراد، i_{ph} گرمای نهان تغییر فاز سیال، ρ_{ice} چگالی یخ، $C_{p, ice}$ ظرفیت گرمایی ویژه یخ در فشار ثابت، و T_{ST} دمای سطح مخزن هستند.

از دیگر پارامترهای اصلی برای کاهش تلفات حرارتی و افزایش کارایی سیستم ذخیره یخ می‌توان به استفاده از بهینه‌ترین مساحت سطح اشاره کرد. مساحت سطح مخزن نقش عمده‌ای در تبادل حرارتی بین سطح مخزن و محیط ایفا می‌کند. برای محاسبه سطح مقطع بهینه از معادله زیر می‌توان استفاده کرد [۱۸].

$$A_{ST} = 6\pi \left(\frac{V_{ST}}{2\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

که A_{ST} سطح و V_{ST} حجم مخزن ذخیره یخ است. چیلر به‌عنوان تجهیز اصلی سیستم تهویه مطبوع، بیشترین نرخ انرژی الکتریکی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. می‌توان برای محاسبه میزان نرخ انرژی مورد نیاز برای تبدیل آب موجود در مخزن ذخیره به یخ از معادله زیر استفاده کرد [۱۸ و ۲۵].

$$\dot{Q}_{EV} = \frac{Q_{ST}}{t_{ch}} \quad (5)$$

که در آن، t_{ch} زمان مورد نیاز برای تولید یخ است که معمولاً این زمان نسبت به حجم یخ تولیدی و استراتژی‌های مورد استفاده در سیستم ذخیره یخ متغیر می‌باشد.

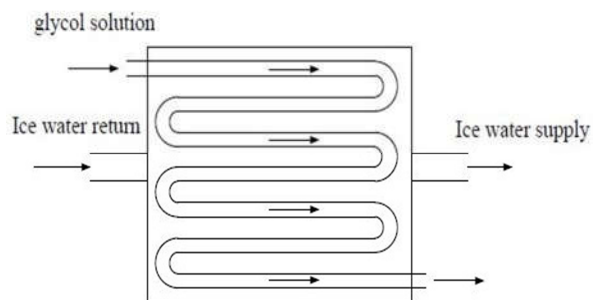
کل انرژی الکتریکی مصرفی توسط سیستم تهویه مطبوع از ساعات اوج بار به ساعات کم‌باری می‌شود.

ب. بار جزئی محدود

در این حالت، سیستم در ترکیب با سیستم تهویه مطبوع، ساعات میان‌باری و اوج‌باری را برای تأمین بار سرمایشی تحت پوشش خود قرار می‌دهد؛ بدین‌گونه که ۵۰٪ بار سرمایشی توسط سیستم تهویه مطبوع و ۵۰٪ دیگر توسط انرژی موجود در یخ ذخیره‌شده تأمین می‌گردد.

۵. مخزن ذخیره یخ

از مهم‌ترین اجزای اصلی یک سیستم ذخیره یخ می‌توان به مخزن ذخیره یخ اشاره کرد (شکل ۴). در طراحی مخزن ذخیره‌سازی پارامترهای مختلفی دخیل است. اساس کار این مخزن بدین صورت است که در ساعات کم‌باری شبکه برق، آب داخل مخزن با استفاده از کویل‌های به‌کاربرده‌شده در داخل مخزن و جریان محلول آب و گلیکول موجود در داخل مبدل تبدیل به یخ شده و در ساعات اوج‌باری این یخ در تماس با سیال عبوری، دمای سیال را کاهش می‌دهد و به‌سمت مبدل حرارتی هواخنک‌کن موجود در هواساز هدایت می‌شود.



شکل (۴): طرح‌واره مخزن ذخیره یخ

اولین پارامتر اساسی برای طراحی مخزن ذخیره، برآورد انرژی مورد نیاز آب جهت تبدیل از فاز مایع به فاز جامد است. از این‌رو که انرژی یخ تولیدشده قادر باشد تا در استراتژی‌های ذکرشده، بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان را برای ایجاد یک محیط مطبوع از لحاظ دما و رطوبت برای ساکنان تأمین نماید. به‌منظور محاسبه انرژی حرارتی مورد نیاز سیال مذکور جهت تغییر فاز از حالت مایع به جامد و برعکس، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۸].

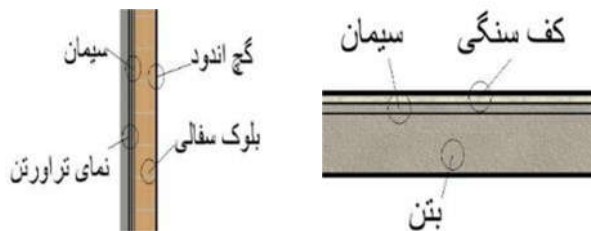
$$Q_{ST} = \frac{Q_C}{\eta_{ST}} \quad (1)$$

که در آن، Q_{ST} مقدار بار حرارتی مخزن و Q_C حداکثر بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان در گرم‌ترین روز سال و η_{ST} کارایی مخزن

است. نمای بیرونی ساختمان در شکل (۶) و لایه‌های به‌کاررفته در دیوار خارجی و سقف ساختمان در شکل (۷) نشان داده است.



شکل (۶): نمای بیرونی ساختمان مورد مطالعه (ساختمان اداری دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، چابهار، ایران)



شکل (۷): لایه‌های به‌کار رفته در دیوار خارجی و سقف ساختمان

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی مصالح [۲۷ و ۲۸]

| مواد | ضخامت (mm) | هدایت گرمایی (W/mK) | چگالی (kg/m ³) | ظرفیت حرارتی (kJ/m ³ K) |
|------------|------------|---------------------|----------------------------|------------------------------------|
| سنگ نما | ۱۵ | ۲/۸ | ۲۸۸۰ | ۱/۰ |
| سیمان | ۱۰ | ۰/۹ | ۱۱۵۰ | ۰/۸۴۰ |
| بلوک سفالی | ۲۰۰ | ۱/۱ | ۱۷۷۰ | ۱/۳ |
| گچ‌اندود | ۱۵ | ۱/۳۶۸ | ۱۱۲۰ | ۱/۰ |
| بتن | ۳۰۰ | ۷/۷۴۰ | ۲۴۰۰ | ۱/۰ |
| آسفالت | ۵۰ | ۱/۱۵۰ | ۲۱۰۰ | ۱/۰ |
| پوکه | ۵۰ | ۰/۲۱۰ | ۳۵۱ | ۰/۸۷۹ |

۷. شبیه‌سازی ساختمان

برای شبیه‌سازی ساختمان مذکور از اجزای مختلف (کامپوننت) موجود در کتابخانه نرم‌افزار TRNSYS که هرکدام بیانگر یک تجهیز یا دستگاه می‌باشد، استفاده شده است. با وجود این برای شبیه‌سازی کل مجموعه (ساختمان به‌همراه سیستم‌های برودتی موجود)، برخی از اجزا در کتابخانه نرم‌افزار موجود نبوده و با استفاده از کدنویسی تحت زبان برنامه‌نویسی فرترن، به کتابخانه نرم‌افزار اضافه شدند. به‌منظور مدل‌سازی کل فیزیک ساختمان و تمامی موارد مرتبط با سرمایش فضای ساختمان در نرم‌افزار TRNSYS، می‌توان از برنامه‌های متصل با نرم‌افزار یعنی

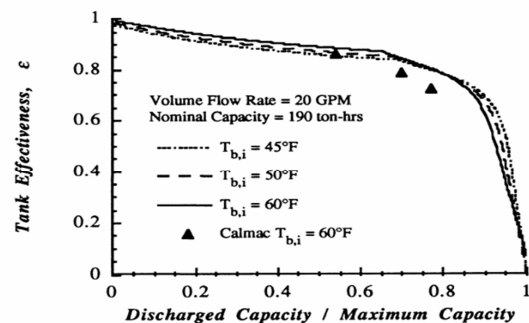
فرایند تولید و ذوب یخ یک فرایند گذرا و وابسته به زمان و دمای سیال است. از معادله زیر برای محاسبه نرخ تولید و ذوب یخ استفاده می‌شود [۱۸ و ۲۶].

$$IBR = \frac{Q_{l,dc} + Q_w}{i_{ice}} \quad (۶)$$

در این رابطه، IBR نرخ ذوب یخ و Q_w میزان حرارت تبادل شده بین یخ و سیال عبوری و i_{ice} مقدار گرمای نهان یخ است. انتقال حرارت از سیال به یخ و برعکس، به‌صورت نهان و محسوس صورت می‌گیرد. بدین ترتیب که تبدیل آب مخزن به آب صفر درجه سانتی‌گراد به‌صورت محسوس و تبدیل آب صفر درجه سانتی‌گراد به یخ صفر درجه سانتی‌گراد به‌صورت نهان است. میزان انتقال حرارت در این فرایند از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۶].

$$Q_w = eps \cdot C_{p,w} (T_{in,w} - T_{ST}) \quad (۷)$$

در این رابطه، $T_{in,w}$ دمای آب ورودی به مخزن و eps ضریب تجربی که بر اساس دمای سیال ورودی به داخل مخزن به دست می‌آید. شکل (۵) فرایند ذوب یخ در داخل مخزن ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد.



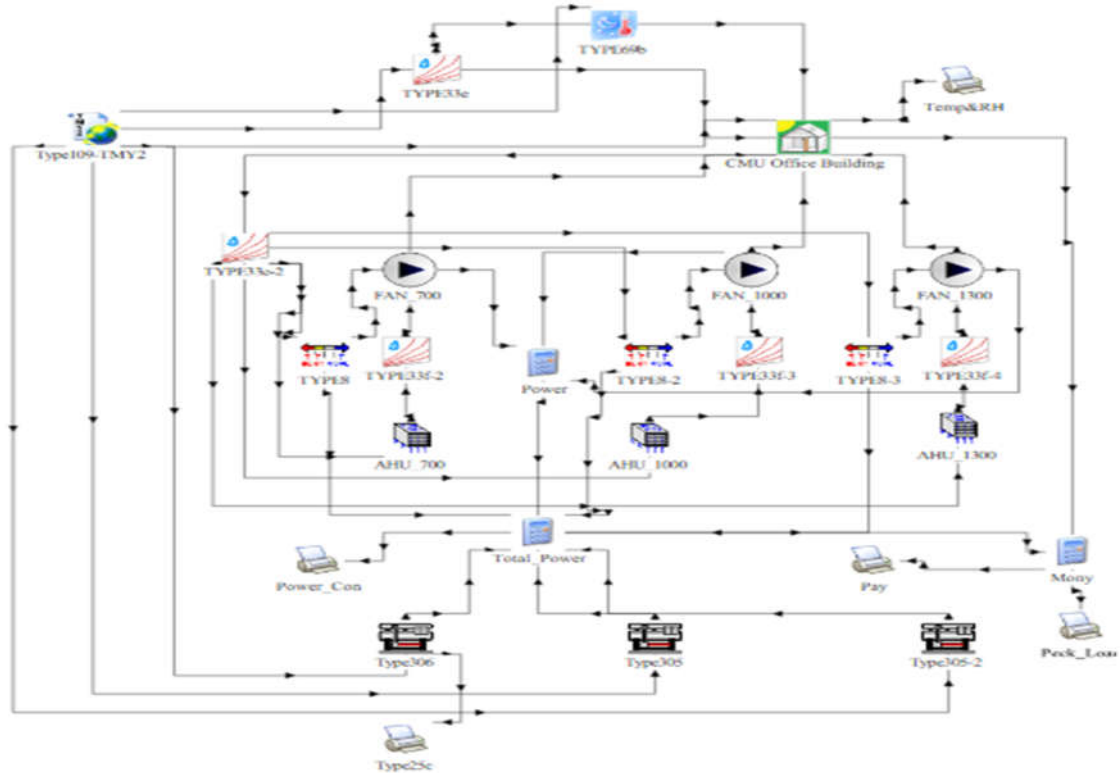
شکل (۵): فرایند ذوب یخ در داخل مخزن ذخیره‌ساز [۲۶]

۶. معرفی ساختمان مورد مطالعه

در این تحقیق، ساختمان اداری دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار واقع در جنوب استان سیستان و بلوچستان، به‌عنوان ساختمان مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. این ساختمان در جنوب شرق ایران واقع شده و همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، منطقه جنوب شرق ایران منطقه‌ای با بار سرمایشی مورد نیاز بالا محسوب می‌شود. این ساختمان دارای زیربنای حدود ۱۰۰۰ متر مربع و دارای ۵۱ اتاق بوده که از سه سیستم هواساز از نوع پشت‌بامی با ظرفیت‌های ۷۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۳۰۰۰ فوت مکعب بر دقیقه برای تأمین بار سرمایشی در آن استفاده شده است. مصالح به‌کاررفته در ساختمان از نوع مصالح سنگین‌وزن نظیر بتن، سفال، سنگ و... است. خواص ترموفیزیکی مصالح به‌کاررفته در جدول (۱) آمده

چیلرها و پمپها بوده که با استفاده از خطوطی که رابط بین دو یا چند اجزا می باشد، داده های ورودی و خروجی را بین دستگاهها مبادله می کند. اجزای به کاررفته در فرایند شبیه سازی در جدول (۲) توضیح داده شده اند.

TRNBuild و SimCAD استفاده کرد. شکل (۸) شبیه سازی وضعیت موجود را در محیط نرم افزار TRNSYS نشان داده است. هریک از اجزای گرافیکی نشان داده شده در شکل (۸) بیانگر یک تجهیز مورد استفاده در ساختمان مانند دستگاه های هواساز،



شکل (۸): شبیه سازی وضعیت موجود در محیط نرم افزار TRNSYS (ساختمان به همراه سیستم سرمایشی موجود)

به منظور اعتبارسنجی شبیه سازی وضعیت موجود، داده های شبیه سازی با داده های میدانی مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور داده های میدانی (دما و رطوبت نسبی) توسط دستگاه داده سنج انیمومتر (دارای خطای ۳ درصد و ۰/۴ درصد در اندازه گیری رطوبت نسبی و اندازه گیری دما و دقت ۰/۱ درصد و ۰/۱ درجه سانتی گراد در اندازه گیری رطوبت نسبی و اندازه گیری دما) در چند زمان مختلف اندازه گیری شدند. شایان ذکر است به منظور کاهش خطای اندازه گیری، داده ها در چندین نوبت و نقطه از فضا اندازه گیری و میانگین آن ها در نظر گرفته شده است. میزان انحراف داده های خروجی از نرم افزار در مقایسه با داده های میدانی در جدول (۳) آمده است.

۸. شبیه سازی ساختمان به همراه سیستم ذخیره یخ

همان گونه که قبلاً نیز به آن اشاره شد، این سیستم در سه استراتژی بار کامل، بار جزئی محدود و بار جزئی تقاضا مورد بررسی قرار گرفته و به منظور اضافه کردن اجزای جدید به محیط نرم افزار،

جدول (۲): اجزای به کاررفته در شبیه سازی ساختمان در وضعیت موجود

| نماد | توصیف | عملکرد |
|---|------------------------|--|
|  | خواندن فایل TMY | بارگذاری اطلاعات TMY برای استفاده از داده های آب و هوایی |
|  | خواندن اطلاعات ساختمان | بارگذاری اطلاعات مربوط به ساختمان طراحی شده با TRNBUILT |
|  | خواندن دمای آسمان | بارگذاری دمای اتمسفر برای محاسبه تشعشعات |
|  | نمودار سایکرومتریک | محاسبه گر رطوبت مخصوص، چگالی هوا، دمای خشک |
|  | ترموستات | کنترل دمای داخل ساختمان برای خاموش و روشن کردن سیستم تهویه مطبوع |
|  | چیلر | کامپوننت چیلر (محاسبه بار سرمایشی و توان مصرفی کمپرسور) |
|  | هواساز | کامپوننت هواساز (محاسبه دما و رطوبت خروجی از دستگاه هواساز) |
|  | محاسبه گر | محاسبه داده ها |
|  | خروجی | چاپ داده های خروجی از شبیه سازی |

۹. ارائه نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم موجود و سیستم موجود به‌همراه سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف عملکردی ارائه شده است. شایان ذکر است مطالعه برای ماه‌هایی از سال انجام شده است که بر اساس استاندارد اشرفی نیاز به فراهم کردن بار سرمایشی برای فضای داخل ساختمان وجود دارد. بنابراین شبیه‌سازی‌ها در بازه زمانی ماه آوریل تا نوامبر انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌اند.




در شکل (۱۰) دمای متوسط ماهیانه فضای داخل ساختمان در وضعیت موجود ساختمان و ساختمان به‌همراه سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار کامل به‌عنوان نمونه‌ای از استراتژی‌های سه‌گانه مطالعه شده نشان داده شده است. بررسی نشان می‌دهد میزان انحراف دما از شرایط پیشنهادی استاندارد اشرفی برای آسایش ساکنان به‌طور متوسط ۳/۴٪ بالاتر می‌باشد که این اختلاف دمایی ناشی از ذوب شدن یخ و کاهش دمای آن بر اثر اختلاط آب و یخ و کاهش دمای سطح کویل موجود در داخل مخزن ذخیره یخ در ساعات اوج گرمای روز است.

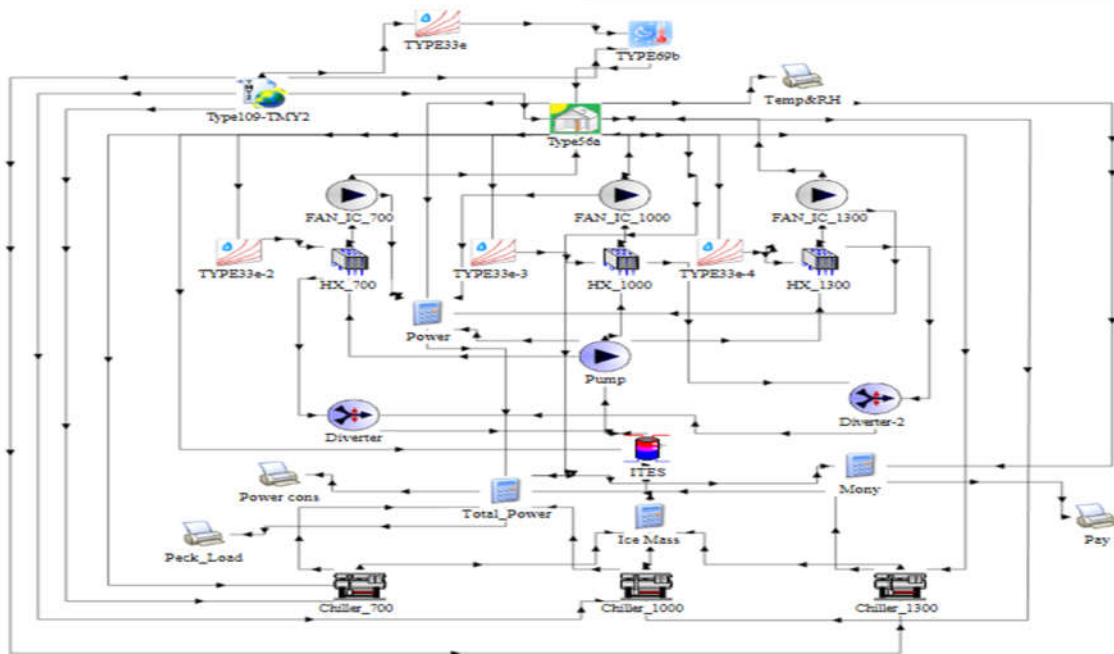
اجزای مورد نیاز به‌عنوان تجهیز جدید تعریف و به کتابخانه نرم‌افزار اضافه شده‌اند. شکل (۹) شبیه‌سازی حالت ساختمان به‌همراه سیستم ذخیره یخ در محیط نرم‌افزار TRNSYS را نشان می‌دهد. اجزای اضافه‌شده به محیط نرم‌افزار در جدول (۴) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): داده‌های میدانی و نتایج شبیه‌سازی

| ماه | Apr. | May | Jun. |
|------------------------|------|------|------|
| دما (میدانی) | ۲۴/۳ | ۲۳/۵ | ۲۴/۰ |
| دما (شبیه‌سازی) | ۲۲/۸ | ۲۲/۲ | ۲۲/۶ |
| انحراف-دما (٪) | ۶/۱ | ۵/۵ | ۵/۸ |
| رطوبت نسبی (میدانی) | ۶۱/۲ | ۶۳/۰ | ۶۲/۰ |
| رطوبت نسبی (شبیه‌سازی) | ۵۷/۰ | ۵۹/۲ | ۵۸/۳ |
| انحراف-رطوبت نسبی (٪) | ۶/۸ | ۶ | ۵/۹ |

جدول (۴): اجزای به‌کاررفته در شبیه‌سازی ساختمان به‌همراه سیستم ذخیره یخ

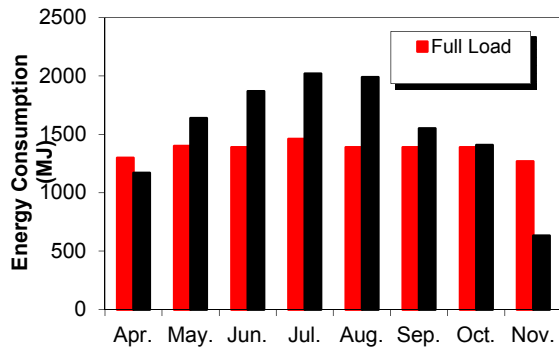
| نماد | توصیف | عملکرد |
|---|---------------|--|
|  | مخزن ذخیره یخ | کامپوننت مخزن ذخیره‌سازی یخ برای تأمین بار سرمایشی ساختمان |
|  | جمع‌کننده | ترکیب‌کننده سیال‌ها |
|  | پمپ | انتقال سیال از مخزن ذخیره به مبدل حرارتی |



شکل (۹): شبیه‌سازی سیستم سرمایشی ساختمان به‌همراه سیستم ذخیره یخ در محیط نرم‌افزار TRNSYS

جدول (۵) ارائه شده است. طبق جدول (۵) سیستم ذخیره یخ قادر است دمای فضای داخل ساختمان را در محدوده دمایی ۲۳/۲۱ تا ۲۴/۶۹، ۲۰/۸۲ تا ۲۶/۴۱، ۲۲/۴۰ تا ۲۶/۱۹، ۲۳/۴۶ تا

نتایج شبیه‌سازی برای دمای متوسط ماهیانه فضای داخل ساختمان در ماه‌های مورد مطالعه برای وضعیت موجود ساختمان و ساختمان با سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف در



شکل (۱۱): انرژی مصرفی ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار کامل برای ماه‌های مورد مطالعه

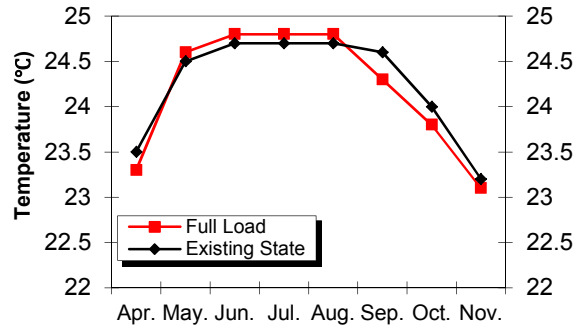
جدول (۶): برق مصرفی سالیانه ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف

| وضعیت موجود | بار کامل | بار جزئی تقاضا | بار جزئی محدود |
|---------------------------------|----------|----------------|----------------|
| ۴۰۳ | ۴۴۴ | ۲۶۴/۴ | ۲۵۰/۲ |
| برق مصرفی (MWh) | | | |
| - | ۱۰/۱۲ | ۳۴/۳۹ | ۳۷/۸۹ |
| تغییرات نسبت به وضعیت موجود (%) | | | |
| - | (افزایش) | (کاهش) | (کاهش) |

همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، در سیستم ذخیره‌سازی یخ، استراتژی بار جزئی قادر بوده تا بخش قابل توجهی از انرژی الکتریکی مصرفی توسط تجهیزات سرمایشی را کاهش دهد. با وجود این، در استراتژی بار کامل به دلیل اینکه ظرفیت دستگاه‌های موجود در استراتژی بار کامل نسبت به وضعیت موجود افزایش یافته و توان بیشتری برای تولید یخ مصرف می‌کند، میزان برق مصرفی در این استراتژی نسبت به وضعیت موجود ۱۰/۱۲٪ افزایش نشان می‌دهد. مقایسه عملکرد استراتژی‌ها نشان می‌دهد استراتژی بار جزئی محدود قادر است تا ۳۷/۸۹٪ از برق مصرفی توسط سیستم تهویه مطبوع را به صورت سالیانه نسبت به وضعیت موجود کاهش دهد.

الگوی مصرف و ساعات اوج بار با توجه به شرایط اقلیمی و حتی فرهنگی کشورها متفاوت است و یکی از چالش‌های اصلی کشورها و شرکت‌های تأمین‌کننده برق، تأمین برق در ساعات اوج بار است. بنابراین کاهش مصرف انرژی الکتریکی در ساعات اوج بار از اهمیت زیادی برخوردار است. در ادامه به بررسی عملکرد سیستم ذخیره یخ در انتقال ساعات اوج بار به ساعات کم‌باری و میان‌باری پرداخته می‌شود. برق مصرفی ساختمان در ساعات اوج بار در استراتژی‌های مختلف عملکردی سیستم ذخیره یخ در جدول (۷) آورده شده است.

۲۵/۶۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در حالات وضعیت موجود، بار کامل، بار جزئی تقاضا و بار جزئی محدود برقرار کند. مقایسه شرایط دمایی فراهم شده با شرایط توصیه شده توسط استاندارد نشان می‌دهد استراتژی عملکردی بار جزئی محدود شرایط دمایی مطلوب‌تری نسبت به بقیه استراتژی‌های عملکردی فراهم می‌کند.



شکل (۱۰): دمای متوسط ماهانه فضای داخلی ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار کامل

جدول (۵): دمای متوسط ماهانه (درجه سانتی‌گراد) فضای داخلی ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف عملکردی

| وضعیت موجود | بار کامل | بار جزئی تقاضا | بار جزئی محدود | Month |
|-------------|----------|----------------|----------------|-------|
| ۲۳/۵۲ | ۲۲/۷۱ | ۲۳/۳۹ | ۲۴/۳۹ | Apr. |
| ۲۴/۵۱ | ۲۴/۸۴ | ۲۵/۳۳ | ۲۴/۹۱ | May |
| ۲۴/۶۷ | ۲۶/۲۰ | ۲۶/۱۵ | ۲۵/۴۲ | Jun. |
| ۲۴/۶۹ | ۲۶/۴۱ | ۲۶/۱۹ | ۲۵/۶۱ | Jul. |
| ۲۴/۶۹ | ۲۶/۳۵ | ۲۵/۶۶ | ۲۵/۵۵ | Aug. |
| ۲۴/۶۴ | ۲۵/۲۳ | ۲۵/۴۳ | ۲۴/۹۰ | Sep. |
| ۲۳/۹۶ | ۲۳/۸۳ | ۲۴/۵۶ | ۲۴/۶۴ | Oct. |
| ۲۳/۲۱ | ۲۰/۸۲ | ۲۲/۴۰ | ۲۳/۴۶ | Nov. |

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، استفاده از سیستم ذخیره‌سازی یخ در استراتژی‌های مختلف موجب کاهش تقاضای انرژی الکتریکی می‌شود که در ادامه به بررسی تأثیر به‌کارگیری استراتژی‌های مختلف سیستم ذخیره یخ در ساختمان مورد مطالعه از دیدگاه انرژی الکتریکی مصرفی پرداخته می‌شود.

انرژی مصرفی ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار کامل به عنوان نمونه‌ای از سه استراتژی مطالعه شده در شکل (۱۱) نشان داده شده و نتایج کلی میزان برق مصرفی سالیانه ساختمان در وضعیت موجود و با سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های مختلف در جدول (۶) آورده شده است.

جدول (۷): برق مصرفی ساختمان در ساعات اوج بار به صورت سالیانه در استراتژی‌های مختلف عملکردی سیستم ذخیره یخ

| وضعیت موجود | بار کامل | | وضعیت موجود | برق مصرفی (MWh) |
|------------------------------|----------|----------|-------------|-----------------|
| | تقاضا | بار جزئی | | |
| موجود | ۶۹/۵۵ | ۱۲۳/۳۴ | محدود | ۱۱۲ |
| کاهش نسبت به وضعیت موجود (%) | ۳۷/۹ | ۹/۱۹ | (کاهش) | ۳۴/۳۹ |
| | (کاهش) | (افزایش) | (کاهش) | |

با وضعیت موجود، توانسته در بعضی از ماه‌ها بیش از ۷۰٪ از هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی الکتریکی را در بخش تهویه مطبوع کاهش دهند. بررسی نشان می‌دهد استراتژی بار جزئی تقاضا به طور میانگین می‌تواند حدود ۶۲/۰۸٪ هزینه برق مصرفی را در ماه‌های گرم سال کاهش دهد و استراتژی بار جزئی محدود و بار کامل به ترتیب قابلیت کاهش به میزان میانگین ۵۹/۵۴٪ و ۴۷/۷۶٪ را دارند.

۱۱. نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تأثیر به‌کارگیری سیستم ذخیره یخ به همراه سیستم سرمایش یک ساختمان اداری واقع در منطقه جنوب شرق ایران، منطقه‌ای با بار سرمایشی زیاد مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا ساختمان مورد مطالعه در وضعیت موجود یعنی ساختمان به همراه سیستم سرمایشی فعال شبیه‌سازی شده و سپس وضعیت موجود به همراه سیستم ذخیره‌ساز یخ اضافه‌شده به ساختمان شبیه‌سازی و تأثیر به‌کارگیری سیستم ذخیره یخ در طول یک سال کاری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. به این منظور از نرم‌افزار TRNSYS استفاده شده است.

به منظور ارزیابی منطقی تر عملکرد سیستم ذخیره یخ، این سیستم در سه استراتژی بار کامل، بار جزئی تقاضا و بار جزئی محدود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بهترین استراتژی برای شرایط اقلیمی ساختمان از دیدگاه انرژی الکتریکی مصرفی، حالت بار جزئی محدود با ۳۷/۸۹٪ کاهش سالیانه در انرژی مصرفی توسط دستگاه‌های برودتی نسبت به وضعیت موجود است. به علاوه در ساعاتی از روز که با افزایش بیش از استاندارد مصرف انرژی الکتریکی (ساعات اوج بار)، شبکه تأمین برق دچار مشکل جدی در تأمین برق متقاضیان می‌شود، بهره‌گیری از استراتژی بار جزئی تقاضا می‌تواند به عنوان کارآمدترین استراتژی جهت انتقال بار برق مصرفی از ساعات اوج بار و میان‌باری به ساعات کم‌باری به میزان ۳۷/۹٪ مورد لحاظ قرار بگیرد. به علاوه نتایج تحقیق نشان می‌دهد از لحاظ اقتصادی، با استفاده از سیستم ذخیره یخ در استراتژی بار جزئی تقاضا امکان کاهش به میزان میانگین حدود ۶۲/۰۸٪ در هزینه‌های برق مصرفی در طول سال فراهم می‌گردد و استراتژی بار جزئی محدود و بار کامل به ترتیب قابلیت کاهش به میزان میانگین ۵۹/۵۴٪ و ۴۷/۷۶٪ را دارند.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۷)، استفاده از استراتژی بار جزئی تقاضا توانسته بیشترین برق مصرفی توسط سیستم سرمایشی را به میزان حدود ۳۷/۹٪ از ساعات اوج بار به ساعات کم‌باری منتقل کند. با در نظر گرفتن این موضوع که این سیستم تنها زمانی به همراه دستگاه‌های سرمایشی عمل می‌کند که زمان تأمین بار سرمایشی ساختمان در ساعات اوج بار خود قرار بگیرد، این استراتژی می‌تواند انرژی الکتریکی بیشتری را از ساعات اوج بار به ساعات کم‌باری نسبت به سایر استراتژی‌ها منتقل نماید.

۱۰. دیدگاه اقتصادی

در بخش‌های قبل، تأثیر سیستم ذخیره‌سازی یخ بر روی انتقال بار مصرفی انرژی الکتریکی از ساعات اوج بار به ساعات کم‌باری و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه هزینه مصرف انرژی الکتریکی در ساعات کم‌بار و اوج بار روز متفاوت است [۲۹]، در این بخش، این سیستم از لحاظ اقتصادی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. تحلیل اقتصادی در انتخاب و پیشنهاد بهینه‌ترین استراتژی عملکردی سیستم ذخیره یخ و تأثیر آن بر کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف انرژی الکتریکی در ساعات اوج بار کمک قابل توجهی می‌کند. به این منظور مقدار هزینه پرداختی برای مصرف برق در وضعیت موجود ساختمان ($Cost_{Exs}$) و همچنین به‌هنگام بهره‌گیری ساختمان از سیستم ذخیره یخ در استراتژی‌های عملکردی مطالعه‌شده ($Cost_{ITS}$) محاسبه و در جدول (۸) آمده است. هزینه برق مصرفی طبق تعرفه برق مصرفی و درصد کاهش هزینه ($Cost Red.$) از رابطه زیر برآورد شده است.

$$Cost Red. (\%) = \left(\frac{Cost_{Exs} - Cost_{ITS}}{Cost_{Exs}} \right) \times 100 \quad (8)$$

همان‌گونه که در جدول (۸) نشان داده شده است، استراتژی بار جزئی تقاضا و بار جزئی محدود با توجه به کاهش چشمگیر تولید یخ در ساعات کم‌باری و استفاده از این استراتژی‌ها در ترکیب

جدول (۸): هزینه انرژی الکتریکی مصرفی در استراتژی‌های مختلف عملکردی و درصد کاهش نسبت به وضعیت موجود

| Nov. | Oct. | Sep. | Aug. | Jul. | Jun. | May | Apr. | ماه |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| ۱۲/۶ | ۱۰/۹ | ۱۶/۲ | ۲۱/۷ | ۲۱/۷ | ۲۰/۰ | ۱۷/۳ | ۱۲/۶ | وضعیت موجود (میلون ریال) |
| ۸/۱۸ | ۸/۶۷ | ۸/۵۷ | ۸/۹۸ | ۸/۹۹ | ۸/۵۹ | ۸/۷۳ | ۸/۱۸ | بار کامل (میلیون ریال) |
| ۳۵/۲۱ | ۴۰/۶۵ | ۴۷/۱۹ | ۵۸/۶۲ | ۵۸/۶۳ | ۵۶/۹۵ | ۴۹/۶۰ | ۳۵/۲۴ | درصد کاهش نسبت به وضعیت موجود (%) |
| ۵/۷۱ | ۵/۶۷ | ۵/۴۵ | ۵/۷۷ | ۵/۷۷ | ۵/۵۵ | ۵/۶۹ | ۵/۴۵ | بار جزئی تقاضا (میلیون ریال) |
| ۲۷/۵۵ | ۶۱/۲۳ | ۶۵/۸۴ | ۷۲/۴۱ | ۷۳/۴۳ | ۷۲/۱۷ | ۶۷/۱۵ | ۵۶/۸۶ | درصد کاهش نسبت به وضعیت موجود (%) |
| ۶/۰۶ | ۶/۰۵ | ۵/۹۳ | ۶/۱۸ | ۶/۱۹ | ۵/۹۵ | ۶/۰۸ | ۵/۸۰ | بار جزئی محدود (میلیون ریال) |
| ۲۳/۱۵ | ۵۸/۵۷ | ۶۳/۴۴ | ۷۱/۵۳ | ۷۰/۵۳ | ۷۰/۲۰ | ۶۴/۸۸ | ۵۴/۰۲ | درصد کاهش نسبت به وضعیت موجود (%) |

مراجع

- [1] <https://weather.com/weather/monthly>.
- [2] ASHRAE, ASHREA Handbook, HVAC Systems and Equipment's (2008).
- [3] Erdemir, D., Altuntop, N. and Çengel, Y.A., "Experimental investigation on the effect of ice storage system on electricity consumption cost for a hypermarket", Energy and Buildings, Vol. 251, pp. 111368, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111368>.
- [4] Rismanchi, B., Saidur, R., Masjuki, H.H. and Mahlia, T.M.I., "Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications", Energy and Buildings, Vol. 50, pp.347-354, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.001>.
- [5] Hu, C., Li, M., Wang, Y., Li, G., Ma, X., Du, W., Zhou, X. and Zhang, Y., "Preliminary investigation on pilot-scale photovoltaic-driven cold storage with ice thermal storage based on vapor compression refrigeration cycle", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 45, pp. 101187, 2021, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101187>.
- [6] Ahn, J.H., Kim, H., Kim, J.H. and Kim, J.Y., "Evaporative cooling performance characteristics in ice thermal energy storage with direct contact discharging for food cold storage", Applied Energy, Vol. 330, Part A, pp. 120334, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120334>.
- [7] Fadi, A.G. and Dag, R.O., "Performance and feasibility of utilizing solar powered ice storage system for space cooling applications", Energy Conversion and Management: X, Vol. 16, pp. 100319, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100319>.
- [8] Rahgozar, S., Dehghan, M., Pourrajabian, A. and Haghgou, H., "Economic feasibility of ice storage systems for office building applications: a climate sensitivity analysis", Journal of Energy Storage, Vol. 45, pp.103712, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103712>.
- [9] Liang, H., Yanfeng, L., Dengjia, W., Xi, L. and Huaican, L., "Feasibility analysis and feature comparison of cold thermal energy storage for off-grid pv Air-conditioned Buildings in the Tropics", Energy Conversion and Management, Vol. 254, pp. 115176, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115176>.
- [10] Ismail, M.S., Wael, M.E.M. and Mohamed, E.h. "Utilizing the solar ice storage system in improving the energy, exergy, economic and environmental assessment of conventional air conditioning system", Alexandria Engineering Journal, Vol. 61, No. 10, pp. 8149-8160, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.015>.
- [11] Rahdar, M.H., Emamzadeh, A. and Ataei, A., "A comparative study on pcm and ice thermal energy

- storage tank for air-conditioning systems in office buildings*", Applied Thermal Engineering, Vol. 96, pp. 391-399, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107>.
- [12] Liu, Z., Quan, Z., Zhao, Y., Jing, H., Liu, X. and Wang, L., "Experimental research on the performance of ice thermal energy storage device based on micro heat pipe arrays", Applied Thermal Engineering, Vol. 185, pp. 116452, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116452>.
- [13] Heine, K., Tabares-Velasco, P.C. and Deru, M., "Energy and cost assessment of packaged ice energy storage implementations using open studio measures", Energy and Buildings, Vol. 248, pp. 111189, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111189>.
- [14] Abdullah, M.O., Yii, L.P., Junaidi, E., Tambi, G. and Mustapha, M.A., "Electricity cost saving comparison due to tariff change and ice thermal storage (ITS) usage based on a hybrid centrifugal-ITS system for buildings: a university district cooling perspective", Energy and Buildings, Vol. 67, pp. 70-78, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.008>.
- [15] Asgari, H., Mehdipour, R. and Shafiei, D., "Technical and economic evaluation of ice thermal energy storage performance in different climates for official buildings in iran", Energy Engineering and Management, Vol. 10, No. 1, pp. 72-81, 2020, (In Persian) <https://doi.org/10.22052/10.1.72>.
- [16] Majidzadeh, M., "Development of a modified energy saving glass for energy management of air conditioning system and transmission improvement of in-service frequency bands", Energy Engineering and Management, Vol. 9, No. 1, pp. 48-55, 2019, (In Persian) <https://doi.org/10.22052/9.1.48>.
- [17] Kargarsharifabad, H., Armaghani, T., Bagherie Behbahani, M. and Heidari, M., "Numerical analysis of inlet and outlet room air vent position for reaching the best ventilation condition with an energy approach", Energy Engineering and Management, Vol. 11, No. 1, pp. 76-87, 2021, (In Persian) <https://doi.org/10.22052/11.1.76>.
- [18] Sanaye, S. and Hekmatian, M., "Ice thermal energy storage (ITES) for air-conditioning application in full and partial load operating modes", International Journal of Refrigeration, Vol. 66, pp. 181-197, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.014>.
- [19] <https://www.iranboom.ir/>.
- [20] <http://www.trnsys.com/support/index.html>.
- [21] Chaung, T.W. and Yao, H.T., "Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality operation", International Journal of Hospitality Management, Vol. 46, pp. 46-54, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2015.01.005>.
- [22] Arcuri, B., Spataru, C. and Barrett, M., "Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in brazil", Sustainable Cities and Society, Vol. 29, pp. 178-192, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.011>.
- [23] Alva, G., Lin, Y. and Fang, G., "An overview of thermal energy storage systems", Energy, Vol. 144, pp. 341-378, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.
- [24] Yi, W. and Dong, W., "Modeling and simulation of discharging characteristics of external melt-ice-on-coil storage system", International Journal of Smart Home, Vol. 9, No. 2, pp.179-192, 2015, <https://doi.org/10.14257/ijsh.2015.9.2.17>.
- [25] MacPhee, D., Dincer, I., "Performance assessment of some ice TES systems", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, No. 12, pp. 2288-2299, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.012>.
- [26] Jekel, T.B., *Modeling of ice-storage system*, University of Wisconsin, 1991.
- [27] 19th Topic, 1392, "Saving in Energy Consumption, Iran National Buildings Regulations", pp. 88-96.
- [28] ASHRAE, *Handbook Fundamentals, Physical Properties of Materials*, 2005.
- [29] <https://www.moe.gov.ir/>.