



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

# Performance analysis of a thermal energy storage system connected to a cooling tower for chilled water production of radiant ceiling

Farzaneh Rabbani<sup>1</sup>, Mehdi Nasrabadi<sup>2\*</sup>, Seyed Alireza Zolfaghari<sup>3</sup>

1. MSc student, Mechanical Engineering, Department of Engineering, University of Birjand
2. Assistant professor, Mechanical Engineering, Department of Engineering, University of Birjand
3. Associate professor, Mechanical Engineering, Department of Engineering, University of Birjand

\*Corresponding Author: [m.nasrabadi@birjand.ac.ir](mailto:m.nasrabadi@birjand.ac.ir)

---

### PAPER INFO

#### *Paper history:*

Received: 20 August 2022  
Revised: 03 February 2023  
Accepted: 15 February 2023

#### *Keywords:*

Thermal energy storage,  
Cooling tower,  
Radiant cooling,  
Thermal comfort,  
Coefficient of performance.

---

### ABSTRACT

Thermal energy storage systems can reduce the need for energy during peak demand times. In this system, energy is stored during non-peak times and is used during peak demand times. In this research, the performance of the energy storage system in connection with the cooling tower as a sole cooling source of radiant ceiling system has been assessed. Since the performance of the cooling tower depends on the environmental conditions, the performance of the cited cooling system has been investigated in different climate zones. The performance of this system has been evaluated in four cities of Tehran, Shiraz, Tabriz and Bandar Abbas, which are representative of temperate and humid, hot and dry, cold and hot and humid climates respectively. The results presented that by storing the chilled water which is produced by the cooling tower in non-peak hours and using this water in peak hours, the maximum COP of the cooling system could increase to 8.5, 14, 12 and 10 in cities of Tehran, Shiraz, Tabriz and Bandar Abbas, respectively. Furthermore, it can be seen that after implementation of the mentioned cooling system, the chilled water temperature of radiant ceiling system is at least 2 to 3°C lower than the temperature of the water which is provided by the tower in majority of occupant attendance hours, especially during peak demand times. The results indicated that the proposed cooling system in Tehran with a temperate climate is able to provide thermal comfort conditions in 90% of attendance times.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28145.2319>

---

### How to cite this article:

Rabbani, F., Nasrabadi, M., & Zolfaghari, A. (2023). Performance analysis of a thermal energy storage system connected to a cooling tower for chilled water production of radiant ceiling. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(73), 187-200. doi: 10.22075/jme.2023.28145.2319

# ارزیابی عملکرد منبع ذخیره حرارتی در اتصال با برج خنک کن جهت تامین آب سرد مورد نیاز سیستم سرمایش سقفی

فرزانه ربانی<sup>۱</sup>، مهدی نصرآبادی<sup>۲\*</sup> و سید علیرضا ذوالفقاری<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶</p>	<p>سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی می‌توانند نیاز به انرژی در زمان بیشینه تقاضا را کاهش دهند. در این سیستم، انرژی در زمان غیر اوج ذخیره می‌شود و در زمان اوج مصرف، امکان استفاده از این انرژی برای مصرف کننده فراهم می‌گردد. در تحقیق حاضر عملکرد سیستم ذخیره‌سازی انرژی در اتصال با برج خنک کن، به‌عنوان تنها منبع سرمایشی سیستم سرمایش سقفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اینکه عملکرد برج خنک کن به شرایط محیطی بستگی دارد، عملکرد سیستم سرمایشی مذکور در مناطق مختلف آب و هوایی بررسی شده است. عملکرد این سیستم برای چهار شهر تهران، شیراز، تبریز و بندرعباس که به ترتیب به نمایندگی از اقلیم‌های معتدل و مرطوب، گرم و خشک، سرد و گرم و مرطوب انتخاب شده‌اند بررسی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با ذخیره سازی آب سرد تولیدی توسط برج خنک کن در ساعات غیر اوج مصرف و استفاده از این آب سرد در ساعات اوج مصرف، مقادیر بیشینه ضریب عملکرد سیستم سرمایشی برای شهرهای تهران، شیراز، تبریز و بندرعباس به ترتیب ۸/۵، ۱۴، ۱۲/۵ و ۱۰ حاصل می‌گردد. همچنین، با استفاده از این سیستم در بیشتر ساعات کارکرد سیستم سرمایش، دمای آب ارسالی به سیستم سرمایش سقفی حداقل ۲ تا ۳°C کمتر از دمای آب خروجی از برج می‌باشد که مزیت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی را مخصوصاً در ساعات اوج مصرف نشان می‌دهد. نتایج تحقیق حاکی است که سیستم طراحی شده در شهر تهران با اقلیم معتدل و مرطوب قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی در ۹۰٪ ساعات‌های اداری است.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b> ذخیره‌ساز انرژی حرارتی، برج خنک‌کن، سرمایش تابشی، آسایش حرارتی، ضریب عملکرد.</p>	

## ۱- مقدمه

بکارگیری راهکارهایی جهت کاهش مصرف انرژی، محققین راهکارهایی نظیر استفاده از نمای دو پوسته‌ای در ساختمان‌ها، حذف چیلر و استفاده از تجهیزات جایگزین را ارائه کرده اند [۲ و ۳]. یکی از راهکارهای موثر جهت مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش انتشار گازهای آلاینده، ذخیره انرژی حرارتی است. با توجه به

امروزه بخش ساختمان بیش از ۴۰٪ از انرژی مصرفی در جهان را به خود اختصاص می‌دهد و موجب انتشار حدود یک سوم دی اکسید کربن تولیدی در جهان است [۱]. لذا توجه به این بخش از نظر ارائه راهکارهایی جهت کاهش مصرف انرژی و همچنین ارائه پیشنهادهای جهت مدیریت تقاضای انرژی اهمیت دارد. در زمینه مصرف انرژی و لزوم

\*پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.nasrabadi@birjand.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

این مدل برای طیف وسیعی از شرایط ورودی تأیید شده است. حسن و همکاران [۱۰] نتایج پژوهش را در حالت اتصال یک برج خنک‌کن به سیستم سرمایش سقفی برای یک ساختمان مسکونی ارائه نمودند. در این مطالعه یک ساختمان مسکونی چهار طبقه با بیشینه بار داخلی ۷/۴ وات بر مترمربع در شرایط آب و هوایی هلسنکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ضریب عملکرد برج خنک‌کن در حدود ۸/۳ در طی فصل تابستان است. اسپریچر و تیلینکومپ [۱۱] به بررسی عملکرد یک برج خنک‌کن بسته جهت تأمین آب سرد سیستم سرمایشی سطوح سرد از نوع جاسازی شده در سقف و کف پرداختند. در پژوهش اسپریچر و تیلینکومپ جهت مدلسازی از نرم‌افزار TRNSYS استفاده شده است و دو برج خنک‌کن جهت تأمین آب سرد در محدوده دمایی ۱۶ تا ۲۰°C برای یک مرکز خرید بزرگ به مساحت ۱۰۰۰۰ مترمربع با بار داخلی ۴۲ وات بر مترمربع مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد که در گرم‌ترین هفته‌های سال برای شهر لوسرن (سوئیس) می‌توان بار سرمایشی مورد نیاز را از روز به شب منتقل کرد و دمای اتاق را در شرایط آسایش (کمتر از ۲۶°C) نگه داشت. همچنین، نتایج تحقیق نشان داد است که برج‌های خنک‌کن می‌توانند دوسوم بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان را پوشش دهند. کاستلو و فین [۱۲] یک برج خنک‌کن باز جهت تأمین آب سرد مورد نیاز سیستم‌های سرمایش تابشی طراحی کردند. طراحی برج به نحوی صورت گرفت که اختلاف دمای آب خروجی از برج در محدود ۱ تا ۳°C نسبت به دمای مرطوب محیط قرار گرفته باشد. نتایج تجربی نشان داد که این برج توانایی تأمین آب سرد با دمای ۱۶°C با دسترس‌پذیری سالیانه ۸۸٪ برای شرایط آب و هوایی دوبلین را دارد. نصرآبادی و فین [۱۳] بر مبنای برج خنک‌کن طراحی شده توسط کاستلو به تحلیل عملکرد این برج در حالت اتصال به سیستم سرمایشی سطوح سرد در شرایط مختلف آب و هوایی اروپا پرداختند. نتایج مدل‌سازی حاکی از تأمین شرایط آسایش حرارتی در اغلب اوقات (بیش از ۷۷٪) فصل تابستان و امکان صرفه‌جویی انرژی قابل توجه این سیستم در مقایسه با سایر سیستم‌های معمول سرمایشی است. با بکارگیری سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی حرارتی (TES) می‌توان محدودیت‌های استفاده از برج‌های خنک‌کن در اتصال با سیستم‌های سرمایش تابشی را کاهش داد. کاربرد

گرمایش هوا و در نتیجه، افزایش تقاضا جهت انرژی سرمایشی و همچنین محدودیت ظرفیت نیروگاه‌های موجود، اهمیت بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره انرژی جهت دستیابی به ترازمندی در مصرف انرژی الکتریکی را دوچندان می‌کند. از آنجایی که انرژی حرارتی در مقایسه با سایر انواع انرژی به صورت گسترده و با حجم زیاد قابل ذخیره‌سازی است، یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی حرارتی (TES) می‌تواند انرژی حرارتی ذخیره شده را در سیستم‌های تهویه مطبوع بکار گیرد و تقاضای انرژی در زمان اوج مصرف را کاهش دهد [۴]. این سیستم‌ها می‌توانند انرژی را می‌توان به صورت محسوس یا نهان ذخیره کنند؛ هر چند که به دلیل سادگی و کارایی بالای سیستم‌های ذخیره حرارتی محسوس، استفاده از این سیستم‌ها متداول‌تر است [۵]. نمونه‌ای از منابع ذخیره حرارتی محسوس، ذخیره آب سرد تولید شده در ساعات غیر اوج و بکارگیری آن در زمان اوج تقاضا برای سیستم‌های تهویه مطبوع و سرمایش در ساختمان‌ها است [۶].

یکی از انواع سیستم‌های سرمایشی، سیستم‌های سطوح سرد می‌باشند. در این نوع سیستم‌ها دمای آب سرد بیشتر از سایر سیستم‌های متداول است. به عنوان مثال، در سیستم سرمایش سقفی دمای آب سرد در محدوده ۱۴ تا ۱۸°C قرار دارد؛ در حالی که در سیستم فن‌کویل دمای آب سرد مورد نیاز برای کویل سرمایشی در حدود ۵ تا ۹°C است [۷ و ۸]. یکی از راهکارهای تأمین آب سرد، استفاده از برج خنک‌کن است که امکان سرمایش آب تا دمای مرطوب محیط را امکان‌پذیر می‌سازد. اگر چه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از برج خنک‌کن در اتصال با چیلر به عنوان منبع سرمایش سیستم‌های تهویه مطبوع صورت پذیرفته است، اما تعداد محدودی از تحقیقات به موضوع بهره‌گیری برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع تأمین آب سرد برای سیستم‌های سطوح سرد نظیر سرمایش از سقف پرداخته‌اند. حسن و سیرن در سال ۲۰۰۲ [۹]، یک مدل تحلیلی برای استفاده از برج خنک‌کن جهت سرمایش یک ساختمان اداری ارائه نمودند. در این تحقیق یک برج خنک‌کن ۱۰ کیلوواتی جهت اتصال به سیستم سرمایش سقفی برای یک ساختمان اداری کوچک (به مساحت ۷/۹ مترمربع) به کار رفته است. نتایج پژوهش حاکی از ضریب عملکرد فصلی ۸/۴ این سیستم در فصل تابستان برای شهر زوریخ است که بیانگر عملکرد خوب این سیستم می‌باشد.

دما، رطوبت، فشار اتمسفر، باد و سایر مشخصه‌های هواشناسی در مدت‌زمانی نسبتاً طولانی نسبت داده می‌شود و به وسیله طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مشخص می‌شود.

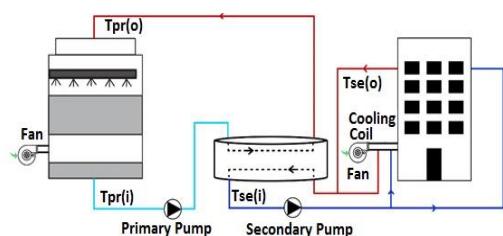
در شکل (۱) اقلیم‌های مختلف موجود در ایران شامل اقلیم معتدل و مرطوب، اقلیم سرد اقلیم گرم و خشک، اقلیم گرم و مرطوب نشان داده شده است [۱۵]. در این مطالعه، عملکرد سیستم‌های سرمایشی در شرایط مختلف آب و هوایی بررسی شده است. برای این منظور، شهرهای تهران، شیراز، بندر عباس و تبریز به ترتیب به نمایندگی از اقلیم‌های معتدل و مرطوب، گرم و خشک، گرم و مرطوب و اقلیم سرد انتخاب شده‌اند.

### ۳- سیستم سرمایش تابشی پیشنهادی

در این پژوهش برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع سرمایش عمل می‌کند. آب سرد تولید شده در ساعات غیر اوج در مخزن ذخیره می‌شود تا در زمان اوج بار مورد استفاده سیستم سرمایش سقفی و تهویه مطبوع جابجایی قرار گیرد. شماتیک این سیستم سرمایشی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- اقلیم‌های مختلف ایران [۱۵]



شکل ۲- شماتیک مدل سرمایشی پیشنهادی

به منظور ارزیابی عملکرد این سیستم، نیاز به شبیه‌سازی تجهیزات است. نرم افزار انرژی‌پلاس که قابلیت ترکیب با سایر محیط‌های نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی همزمان را

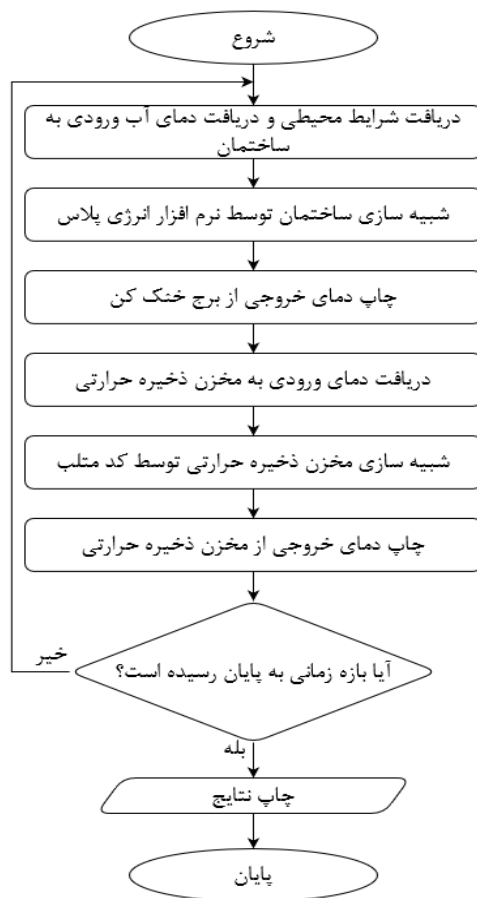
ذخیره انرژی به عنوان آب سرد، برای اطمینان از بهره‌برداری در زمان تعرفه بهینه در سیستم‌های تهویه مطبوع نیز حائز اهمیت است. بر خلاف سایر مصارف برق، سرمایش تنها چند ماه در سال با حداکثر تقاضا روبه‌رو می‌شود. سیستم‌های ذخیره‌سازی همچنین کاربران را قادر می‌سازد تا در جایی که نرخ تعرفه انرژی مازاد است، میزان تقاضای برق خود را کاهش دهند. با توجه به تعرفه بالای مصرف برق در ساعات اوج مصرف و همچنین امکان کاهش میزان مصرف انرژی در ساعات اوج مصرف با استفاده سیستم‌های ذخیره ساز انرژی، بکارگیری از این سیستم‌ها را از لحاظ اقتصادی موجه می‌سازد. نتایج تحقیق رهگذر و همکاران [۱۴] که به بررسی فنی و اقتصادی یک سیستم ذخیره ساز یخ برای یک ساختمان نمونه با کاربری آموزشی در شهر اهواز پرداختند نشان می‌دهد که بکارگیری یک سیستم ذخیره سازی جزئی سرما که بخشی از بار پیک را از طریق سیستم ذخیره تامین می‌کند کاملاً قابل اجرا و اقتصادی است. در نتیجه استفاده از فن‌آوری‌های ذخیره انرژی حرارتی مانند سیستم ذخیره آب سرد در ترکیب با سیستم تهویه مطبوع ساختمان، باعث بهره‌وری و مدیریت مصرف انرژی بهتر در سیستم‌های تهویه مطبوع خواهد شد [۵].

اگرچه در پژوهش‌های محدودی به موضوع استفاده از برج خنک‌کن به عنوان منبع تامین کننده سرمایش اشاره شده است ولی در هیچ‌کدام از این موارد به موضوع ذخیره‌سازی انرژی حرارتی پرداخته نشده است. لذا در این پژوهش، از ایده استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ذخیره آب سرد) در اتصال با برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع سرمایش سیستم سرمایش سقفی استفاده شده است. در این مطالعه تلاش شده است که با حذف چیلر و استفاده از برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع تامین کننده سرمایش، راهکاری برای کاهش مصرف انرژی ارائه گردد و نیز با پیشنهاد استفاده از مخزن ذخیره و عدم استفاده از برج خنک‌کن در ساعات اوج مصرف، روشی برای مدیریت مصرف انرژی بیان شود. با توجه به اینکه کارکرد موثر برج خنک‌کن تابع شرایط محیطی است، عملکرد سیستم سرمایش پیشنهادی در شرایط مختلف آب و هوایی ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- تقسیم‌بندی اقلیمی ایران

اقلیم به شرایط آب و هوایی یک منطقه جغرافیایی نظیر

تعبیه شده در بتن است که اصطلاحاً به عنوان سیستم‌های سرمایه‌ی فعال حرارتی (TABS) شناخته می‌شوند. در این سیستم می‌توان از ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی ساختاری ساختمان استفاده کرد [۲۲]. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر لوله‌ها در سقف ساختمان قرار گرفته‌اند سطح سقف به عنوان سطح سرد لحاظ شده است. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد با بکارگیری این سیستم در یک اتاق اداری در ماه آگوست در کشور چک با بار داخلی ۱۸ وات بر مترمربع، دمای موثر بیش از ۱۰ درجه سانتیگراد کاهش پیدا کرده است [۲۳ و ۲۴].



شکل ۳-فلوچارت عملکرد برنامه شبیه‌سازی

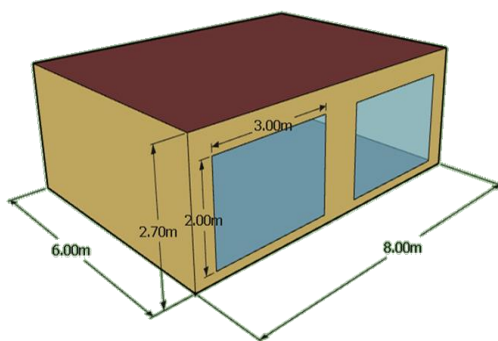
به منظور تامین هوای تازه جهت ساکنان از سیستم تهویه مطبوع جابجایی استفاده شده است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است در این حالت هوای ورودی با عبور از کویل سرمایشی که آب سرد خروجی از مخزن ذخیره در آن جاری است، خنک شده و وارد اتاق می‌شود. در این تحقیق، بر اساس استاندارد قطر لوله‌های سرمایش تابشی ۰/۱۵۸ متر و فاصله لوله‌ها از هم ۰/۱۵ متر است [۲۵] و

دارد، به عنوان ابزار شبیه‌سازی انرژی در تحقیق حاضر استفاده شده است [۱۶-۱۸]. در این نرم‌افزار، امکان مدل‌سازی ساختار ساختمان، بارهای داخلی و خارجی و سیستم‌های خنک‌کننده سرمایش تابشی و تهویه مطبوع جابه‌جایی وجود دارد. در سال ۲۰۱۶، یک سری مطالعات تجربی در چندین آزمایشگاه ملی توسط وزارت انرژی ایالات متحده (DOE) برای تولید مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده جهت استفاده در اعتبارسنجی برنامه‌های شبیه‌سازی انرژی کل ساختمان انجام شد [۱۹]. عواملی نظیر دمای داخلی، شار گرما، جریان هوا و نرخ جریان آب، و همچنین دما در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع، همراه با شرایط محیطی، اندازه‌گیری شدند و با نتایج شبیه‌سازی انرژی پلاس مقایسه شدند. نتایج نشان داد که میانگین خطای مطلق در مقایسه با داده‌های تجربی ۲/۷ درصد است [۱۹]. روش تعادل حرارتی در انرژی پلاس برای محاسبه و تجزیه و تحلیل تغییرات گرما در ساختمان استفاده می‌شود به نحوی که انتقال حرارت از طریق سطوح چندلایه و انتقال حرارت از طریق تجهیزات تهویه مطبوع و همچنین تولید حرارت منابع حرارتی لحاظ می‌شود [۳ و ۲۰]. در این روش، از تعادل شارهای حرارتی که روی هر سطح وجود دارند استفاده شده و دمای سطوح با حل دستگاه معادلات محاسبه می‌شود. جزئیات معادلات ریاضی در مستندات مرجع مهندسی انرژی پلاس [۲۰] ارائه شده است. در برخی از تحقیقات جهت اعتبارسنجی نتایج نرم افزار، نرخ حرارت منتقل شده از تمامی منابع حرارتی با نتایج محاسبه انتقال گرمای محسوس هوای اتاق مقایسه شده است که نتایج نشان می‌دهد که این دو پارامتر اختلاف ناچیزی دارند [۳]. در تحقیق حاضر، تمامی تجهیزات سرمایشی به جز مخزن ذخیره، در نرم افزار انرژی پلاس مدل‌سازی شده است. مخزن ذخیره حرارتی به صورت مجزا به صورت کد متلب مدل‌سازی شده است و کد مربوطه به نرم افزار انرژی پلاس متصل شده است. در این تحلیل مخزنی از جنس استنلس استیل با طول ۱/۸ متر و ضخامت دیواره ۶ میلی‌متر استفاده شده است. قطر مخزن با توجه به دبی آب مورد نیاز سیستم سرمایشی محاسبه شده است. جزئیات مدل‌سازی و اعتبارسنجی مخزن ذخیره به تفصیل در مرجع [۲۱] توضیح داده شده است. فلوچارت اجرای شبیه‌سازی در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این پژوهش سیستم سرمایش تابشی به صورت لوله‌های

ساختمان در نظر گرفته شده در این مطالعه، ساختمان استاندارد CASE600 است که دارای تنها یک ناحیه به مساحت ۴۸ متر مربع و ارتفاع ۲/۷ متر است. این ساختمان دارای دو پنجره هر کدام به مساحت ۶ متر مربع در ضلع جنوبی ساختمان است. در شکل (۵) نمای بیرونی ساختمان نشان داده شده است.

#### ۵- مدل آسایش حرارتی فن‌گر

مدل ریاضی آسایش حرارتی ارائه شده توسط فن‌گر در دهه ۱۹۷۰ به عنوان یکی از مدل‌های آسایش حرارتی رایج شناخته می‌شود [۲۹]. در این مدل آسایش حرارتی تمامی تبدلات انرژی از بدن انسان که شامل انتقال حرارت از جابه‌جایی و تشعشع از سطح بدن و لباس، انتقال حرارت از طریق تعریق و تبخیر در پوست، اتلاف حرارتی تنفسی است را در بر می‌گیرد. در این مدل شرایط حرارتی بدن به عوامل فردی و عوامل محیطی وابسته است. عوامل فردی شامل نرخ متابولیک و میزان عایق بندی لباس‌ها است و عوامل محیطی شامل دمای هوا، دمای متوسط تابشی، فشار بخار هوا و سرعت هوا می‌باشد [۳۰].



شکل ۵- نمای بیرونی ساختمان از دید جنوب غربی

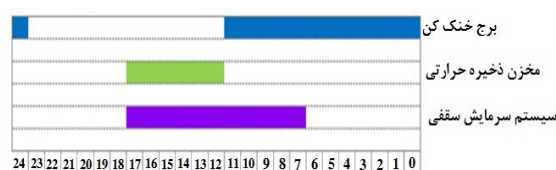
در مدل فن‌گر، تخمین آسایش حرارتی بر اساس شاخص PMV گزارش می‌شود. این شاخص میانگین پاسخ گروه بزرگی از افراد را بر اساس مقیاس احساس حرارتی اشری تخمین می‌زند و مقدار آن در محدوده ۳- (احساس حرارتی خیلی سرد) تا ۳+ (احساس حرارتی خیلی گرم) تغییر می‌کند [۳۰]. در این تحقیق، شاخص PMV در هر گام زمانی توسط نرم افزار محاسبه می‌گردد.

#### ۶- بررسی عملکرد سیستم‌های سرمایشی

در پژوهش حاضر عملکرد سیستم سرمایشی در روز طراحی و همچنین عملکرد آن در ماه‌های گرم سال مورد بررسی قرار گرفته است که به شرح زیر ارائه می‌گردد.

طول کل لوله‌ها نیز با توجه به ابعاد اتاق محاسبه شده است. در شکل (۴) ساعات استفاده از قسمت‌های مختلف سیستم سرمایشی پیشنهادی نشان داده شده است. نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که عملکرد برج خنک‌کن تابع شرایط محیطی است و با افزایش دمای محیط دمای آب سرد تولیدی افزایش می‌یابد [۱۳]. با توجه به وابستگی عملکرد برج خنک‌کن، به عنوان تنها تامین کننده سرمایش، به شرایط محیطی و همچنین به منظور کاهش مصرف انرژی در ساعات اوج مصرف، برج خنک‌کن در ساعات اوج بار خاموش است و در ساعات ۲۳ الی ۷ صبح روز بعد که تعرفه برق نیم بها می‌باشد آب سرد تولیدی توسط برج خنک‌کن در مخزن ذخیره می‌گردد. برج خنک‌کن از ساعت ۷ الی ۱۲ برای تامین آب سرد سیستم سرمایشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ساعات اوج مصرف انرژی، یعنی از ساعت ۱۲، برج خنک‌کن خاموش است و آب سرد مورد نیاز از طریق مخزن ذخیره حرارتی تامین می‌گردد. اگرچه زمان حضور افراد و اعمال بارهای حرارتی داخلی از ساعت ۸ الی ۱۷ است ولی به منظور پیش سرمایش فضای داخلی، سیستم سرمایش از ساعت ۷ صبح شروع به کار می‌کند.

یکی از پارامترهای موثر در انتخاب سیستم سرمایشی، عملکرد آن در مقابل بارهای حرارتی خارجی و داخلی است. تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بار حرارتی ناشی از تجهیزات اداری در محدوده ۶ تا ۳۴ وات بر متر مربع متغیر است [۲۶]. بنابراین مقدار میانگین بار حرارتی تجهیزات یعنی ۱۷ وات بر متر مربع لحاظ شده است. استاندارد EN 13779:2007 برای فعالیت سبک اداری ۱۲۵ وات بر شخص را توصیه کرده که با توجه به چگالی حضور افراد در ساختمان، ۱۳ وات بر متر مربع برای افراد اعمال شده است [۲۶ و ۲۷]. همچنین بار ناشی از سیستم روشنایی ۷ وات بر متر لحاظ شده است [۲۸]. تمامی بارهای حرارتی داخلی فقط در زمان حضور افراد یعنی از ساعت ۸ صبح تا ساعت ۵ بعدازظهر اعمال می‌شوند.



شکل ۴- ساعات بکارگیری بخش‌های مختلف سیستم سرمایشی

#### ۴- فضای نمونه

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است دمای آب خروجی از برج از دمای مرطوب محیط پیروی می‌کند. دمای آب سرد خروجی از برج خنک‌کن در محدوده  $14^{\circ}\text{C}$  تا  $18^{\circ}\text{C}$  متغیر و کمی بیشتر از دمای مرطوب محیط است به‌گونه‌ای که کمترین مقدار آن مربوط به ساعت ۶ و بیشترین مقدار آن در ساعت ۱۲ است که برج خنک‌کن خاموش می‌شود. با توجه به اینکه برج خنک‌کن از ساعت ۱۲ تا ۲۱ خاموش است، تغییر دمایی در آب خروجی مخزن در این ساعات وجود ندارد. با توجه به شکل می‌توان دید که دمای آب سرد خروجی از مخزن (ورودی به ساختمان) و در محدوده  $16^{\circ}\text{C}$  تا  $18^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند و حتی در ساعات ۷ تا ۱۳ کمتر از دمای مرطوب محیط است. با توجه به اینکه برج خنک‌کن حداکثر می‌تواند آب را تا دمای مرطوب محیط خنک کند، نتایج ارائه شده به اهمیت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی برای تامین آب سرد سیستم سرمایش در این ساعات اشاره می‌کند. لازم به ذکر است که برج خنک‌کن از ساعت ۱۲ با افزایش تقاضای شبکه برق خاموش می‌گردد و آب سرد مورد نیاز پس از این زمان توسط مخزن تامین می‌شود. با توجه به اینکه زمان حضور افراد و بارهای حرارتی داخلی از ساعت ۸ تا ۱۷ است، از ساعت ۱۷ به بعد با عدم اعمال بارهای داخلی، پمپ‌های اولیه و ثانویه خاموش می‌شوند و تغییری در دمای آب در چرخه‌های اولیه و ثانویه مشاهده نمی‌گردد.

برای سنجش میزان آسایش حرارتی افراد معیار PMV مورد بررسی قرار گرفته است. این معیار با اختصاص یک عدد به احساس حرارتی افراد در محدوده ۳- تا ۳+ تعریف می‌شود. عدد ۳ بیانگر شرایط خیلی گرم، ۲ گرم، ۱ کمی گرم، ۰ خنثی، -۱ کمی سرد، -۲ سرد و -۳ خیلی سرد است. اگرچه استاندارد حرارتی ایزو ۷۷۳۰، محدوده  $0.5 < PMV < 0.5$  را به عنوان محدوده ایده‌آل برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند [۳۰]، محدوده  $1 < PMV < 1$  که در آن ۸۰٪ افراد حاضر احساس رضایت دارند، به عنوان محدوده قابل قبول آسایش حرارتی توسط برخی از پژوهشگران ارائه است [۳۱]. معیار PMV برای روز طراحی در شهر تهران در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به شکل (۷) می‌توان دریافت در روز طراحی در تمامی ساعات حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول می‌باشد و به عبارتی آسایش حرارتی توسط سیستم سرمایشی

## ۶-۱- بررسی عملکرد سیستم سرمایشی پیشنهادی

### در روز طراحی

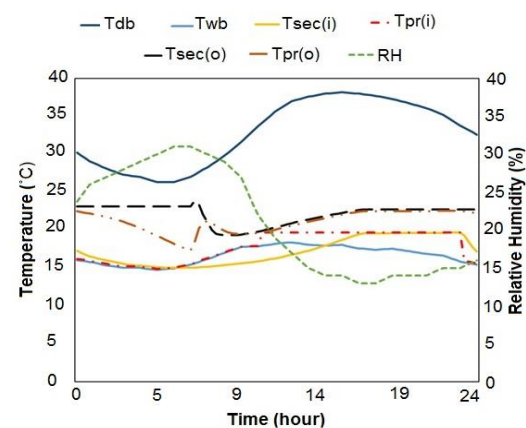
بررسی‌های انجام‌شده برای روز طراحی بر اساس استاندارد ASHRAE صورت گرفته است. مشخصات روز طراحی برای هر یک از شهرها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- شرایط روز طراحی [۳۰]

تهران	شیراز	تبریز	بندرعباس
دمای خشک ( $^{\circ}\text{C}$ )	۳۸/۷	۳۹/۲	۴۱/۸
دمای مرطوب ( $^{\circ}\text{C}$ )	۱۸/۶	۱۸/۳	۲۳/۸

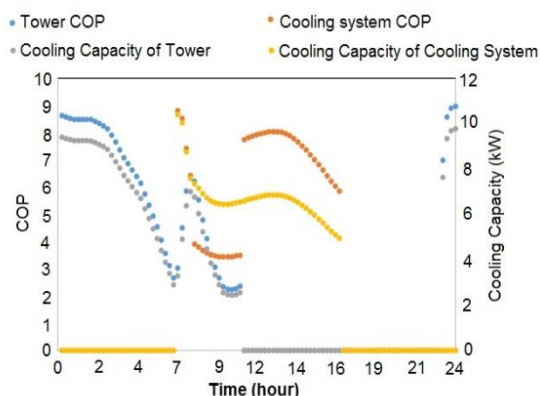
### ۶-۱-۱- شهر تهران

عملکرد سیستم سرمایشی در شهر تهران به نمایندگی از اقلیم معتدل و مرطوب مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۶) نحوه عملکرد سیستم سرمایش برای روز طراحی در شهر تهران نمایش داده شده است. شرایط محیطی توسط عوامل  $T_{db}$ ،  $T_{wb}$ ، RH نشان داده می‌شوند که بیانگر دمای خشک، دمای مرطوب و رطوبت نسبی هستند. همچنین، دمای آب سرد رفت و برگشت در چرخه اولیه و دمای آب رفت و برگشت در چرخه ثانویه نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است  $T_{pr(i)}$  نشان‌دهنده دمای آب ورودی به مخزن در چرخه اولیه و  $T_{pr(o)}$  بیانگر دمای آب خروجی از مخزن در چرخه اولیه است. همچنین،  $T_{sec(i)}$  و  $T_{sec(o)}$  به ترتیب دمای آب خروجی از مخزن و دمای آب ورودی به مخزن در چرخه ثانویه است. چرخه اولیه به چرخه بین برج خنک‌کن و مخزن ذخیره حرارتی و چرخه ثانویه به چرخه بین مخزن ذخیره حرارتی و ساختمان اشاره دارد.



شکل ۶- عملکرد سیستم پیشنهادی در روز طراحی شهر تهران

هرچه میزان ضریب عملکرد بیشتر باشد بیانگر بهره‌وری بالاتر و مصرف انرژی کمتر است. مطابق شکل (۸) ظرفیت حرارتی برج خنک‌کن و سیستم سرمایش به ترتیب بین ۰-۱۰ و ۸/۲-۰ کیلووات متغیر است. ضریب عملکرد برج خنک‌کن در بازه ۱/۹-۹ و همچنین ضریب عملکرد سیستم سرمایش در بازه ۳-۸/۵ تغییر می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب عملکرد سیستم سرمایش در ساعت ۱۲ دارای پرش است که مهم‌ترین علت آن خاموش شدن برج خنک‌کن در این زمان می‌باشد که سبب حذف شدن مصرف انرژی الکتریکی فن برج و پمپ اولیه در معادله شماره ۲ می‌گردد. پس از این زمان، آب سرد مورد نیاز سیستم سرمایشی توسط مخزن تامین می‌شود.



شکل ۸- ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی برج خنک‌کن و سیستم سرمایش در طول روز طراحی در شهر تهران

#### ۶-۱-۲- شهر تبریز

عملکرد سیستم سرمایشی پیشنهادی در شهر تبریز به نمایندگی از اقلیم سرد مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است دمای آب سرد خروجی از برج خنک‌کن در محدود  $12^{\circ}\text{C}$  تا  $18^{\circ}\text{C}$  متغیر است و کمی بیشتر از دمای مرطوب محیط است به نحوی که کمترین مقدار آن مربوط به ساعت ۶ و بیشترین مقدار آن در محدوده ساعت ۱۲ اتفاق می‌افتد. اگرچه دمای آب سرد خروجی از مخزن (ورودی به ساختمان) تقریباً ثابت است و در محدوده  $15^{\circ}\text{C}$  تا  $17^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند، ولی دمای آب برگشتی از ساختمان (ورودی به مخزن) تغییرات محسوس‌تری دارد. همان‌طور که در شکل (۹) می‌توان مشاهده کرد، دمای آب سرد ورودی به ساختمان جهت سیستم سرمایش از سقف در ساعات ۷ تا ۱۶ کمتر از دمای مرطوب محیط است؛ و در ساعاتی نظیر ۱۲ این

پیشنهادی تامین شده و این سیستم برای اقلیم معتدل و مرطوب به خوبی پاسخگو است.

برای بررسی عملکرد حرارتی سیستم سرمایشی به بررسی ضریب عملکرد پرداخته شده است. با توجه به اینکه برج خنک‌کن تنها منبع سرمایش در کار حاضر است بنابراین ضریب عملکرد برج خنک‌کن ( $COP_{Tower}$ ) و ضریب عملکرد سیستم سرمایشی ( $COP_{Cooling system}$ ) مطابق معادلات زیر تعریف شده است [۳۲]:

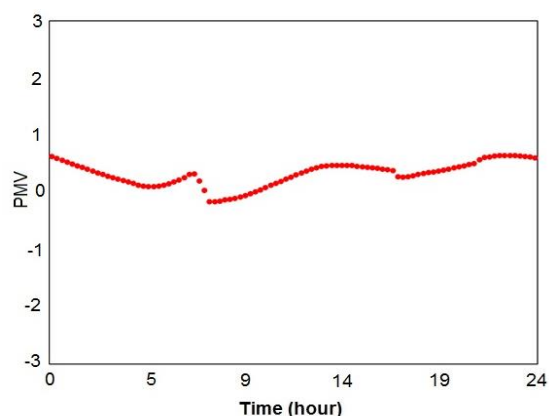
$$COP_{Tower} = \frac{\dot{Q}_{Tower}}{P_{Fan} + P_{Primary pump}} \quad (1)$$

$$COP_{Cooling system} = \frac{\dot{Q}_{Cooling system}}{P_{Fan} + P_{Primary Pump} + P_{secondary Pump} + P_{DV}} \quad (2)$$

در این معادلات  $P_{Secondary Pump}$  و  $P_{Primary Pump}$  به ترتیب نشان‌دهنده توان مصرفی پمپ‌های اولیه و ثانویه می‌باشد. همچنین  $P_{DV}$  و  $P_{Fan}$  به ترتیب توان مصرفی فن برج خنک‌کن و فن سیستم تهویه مطبوع جابجایی را نشان می‌دهد. برای محاسبه ظرفیت سرمایشی برج خنک‌کن و سیستم سرمایش از رابطه زیر استفاده می‌شود:

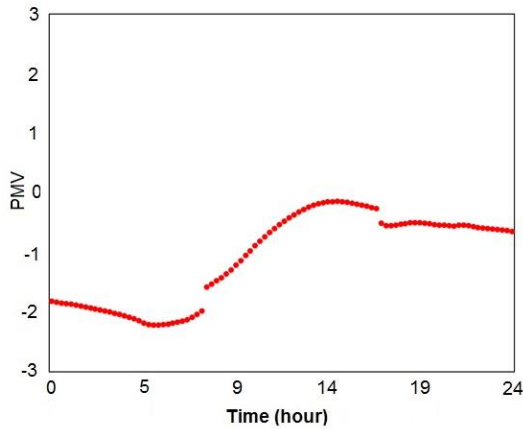
$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad (3)$$

در این معادله ظرفیت سرمایشی برج خنک‌کن با توجه به دمای آب ورودی و خروجی از برج تعیین می‌گردد، به عبارت دیگر با توجه به شکل (۲)،  $T_o$  و  $T_i$  به ترتیب برابر با  $T_{pr}(o)$  و  $T_{pr}(i)$  می‌باشند. به همین صورت ظرفیت سرمایشی سیستم سرمایشی با توجه به دمای آب رفت و برگشت از ساختمان در سیکل ثانویه محاسبه می‌گردد، به بیان دیگر با توجه به شکل (۲)،  $T_o$  و  $T_i$  به ترتیب برابر با  $T_{sec}(o)$  و  $T_{sec}(i)$  می‌باشند.

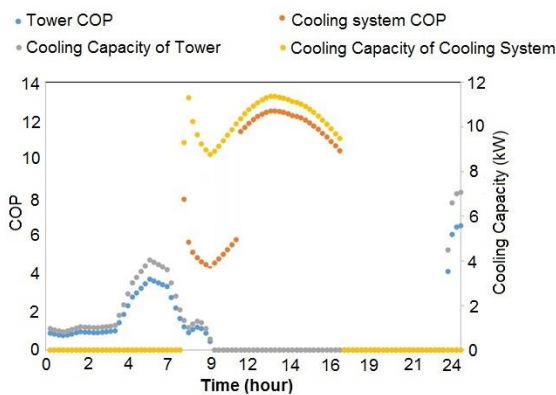


شکل ۷- شاخص آسایش حرارتی در روز طراحی شهر تهران





شکل ۱۰- شاخص آسایش حرارتی در روز طراحی شهر تبریز

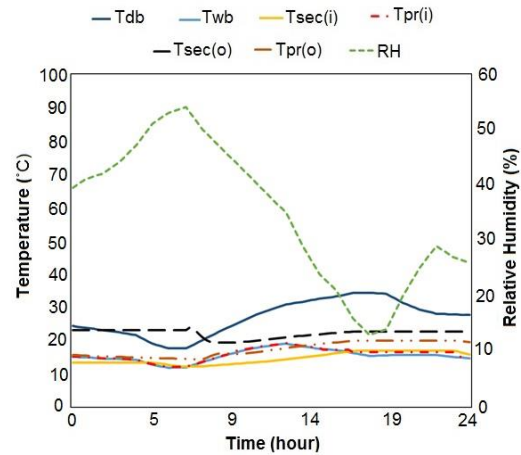


شکل ۱۱- ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی برج خنک کن و سیستم سرمایش در طول روز طراحی در شهر تبریز

### ۶-۱-۳- شهر شیراز

در شکل (۱۲) عملکرد سیستم سرمایشی پیشنهادی در شهر شیراز به نمایندگی اقلیم گرم و خشک بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دمای هوای خشک از ساعت ۶ شروع به افزایش می‌کند و در ساعات ۱۴ الی ۱۵ به حداکثر میزان خود یعنی  $39^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. همچنین رطوبت نسبی روندی کاملاً برعکس دمای هوای خشک دارد. به طوری که در ساعات ۰۰ الی ۶ رطوبت نسبی در حدود بازه ۲۰ الی ۳۰ درصد است و در ساعت ۶ حداکثر میزان خود یعنی ۳۴ درصد را دارا است. دمای آب سرد خروجی از برج خنک‌کن در محدود  $14^{\circ}\text{C}$  تا  $18^{\circ}\text{C}$  متغیر است که کمی بیشتر از دمای مرطوب محیط است به نحوی که کمترین مقدار آن مربوط به ساعت ۶ صبح است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، پس از این ساعت با افزایش دمای خشک، دمای آب خروجی از برج خنک‌کن افزایش می‌یابد در حالی که دمای آب خروجی از مخزن و

اختلاف به  $5^{\circ}\text{C}$  می‌رسد، در حالی که برج خنک کن در بهترین حالت می‌تواند دمای آب را تا دمای مرطوب کاهش دهد. در نتیجه بکارگیری مخزن ذخیره موجب بهبود عملکرد سیستم سرمایشی خصوصاً در ساعات اوج مصرف می‌گردد.

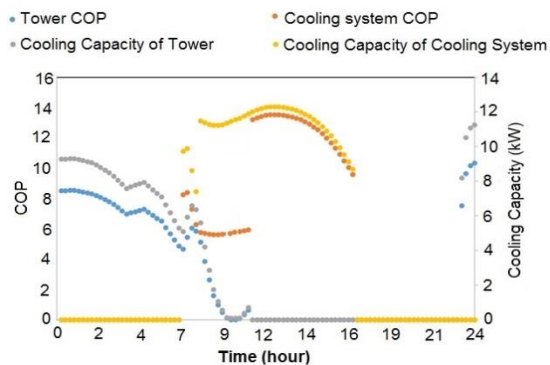


شکل ۹- عملکرد سیستم پیشنهادی در روز طراحی شهر تبریز

با توجه به شکل (۱۰) می‌توان دریافت اگر چه در ساعات حضور افراد از ساعت ۹:۳۰ به بعد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول قرار دارد، در ساعات اولیه حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی کمتر از ۱- است که این عامل را می‌توان به شروع به کار سیستم سرمایش از ساعت ۷ جهت پیش سرمایش ساختمان نسبت داد.

مطابق شکل (۱۱) ضریب عملکرد برج خنک‌کن در بازه ۰/۴ تا ۶/۴ و ضریب عملکرد سیستم سرمایشی در بازه ۴/۴ الی ۱۲/۵ متغیر است. همان‌طور که در شکل مشخص است منحنی ضریب عملکرد برج خنک‌کن از منحنی ظرفیت حرارتی برج خنک‌کن پیروی می‌کند، در حالی که در منحنی ضریب عملکرد سیستم سرمایشی در مقایسه با منحنی ظرفیت حرارتی سیستم سرمایشی پرش‌هایی وجود دارد که می‌توان آنها را به شروع به کار پمپ ثانویه جهت استفاده از سیستم سرمایش سقفی در ساعت ۷ صبح و همچنین خاموش شدن برج خنک‌کن در ساعت ۱۲ مرتبط دانست.

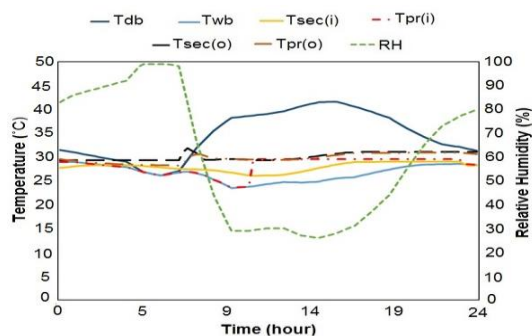
با توجه به شکل (۱۱) می‌توان دید اگر چه ظرفیت حرارتی برج خنک‌کن حداکثر به حدود ۷ کیلووات در ساعت ۲۴ می‌رسد ولی در سیستم سرمایشی با استفاده از مخزن ذخیره، ظرفیت حرارتی سیستم سرمایشی در ساعات اوج مصرف حدود ۱۱ کیلووات است.



شکل ۱۴- ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی برج خنک‌کن و سیستم سرمایش در طول روز طراحی در شهر شیراز

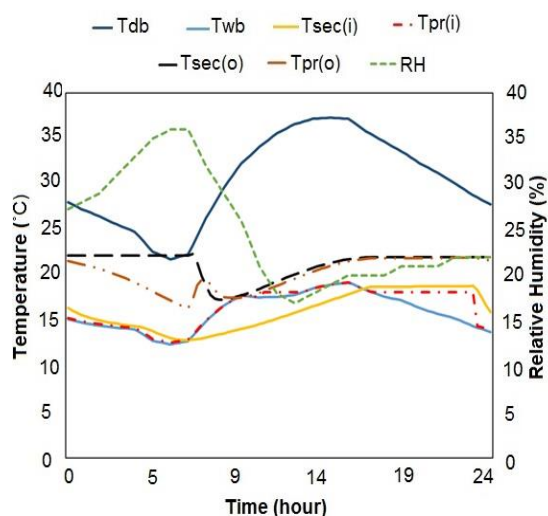
۴-۱-۶- شهر بندرعباس

شکل (۱۵) نحوه عملکرد سیستم سرمایشی برای روز طراحی در شهر بندرعباس به عنوان نماینده اقلیم گرم و مرطوب را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است دمای هوای خشک از ساعت ۶ شروع به افزایش می‌کند و در ساعات ۱۵ الی ۱۶ به حداکثر میزان خود یعنی  $41/7^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. همچنین، رطوبت نسبی روندی کاملاً برعکس دمای هوای خشک دارد به نحوی که در ساعات ۱۵ الی ۱۶ در حدود ۲۶ درصد است و در ساعت ۶ صبح به حداکثر میزان خود یعنی ۹۷ درصد می‌رسد. دمای آب سرد خروجی از برج خنک‌کن در محدود  $25^{\circ}\text{C}$  تا  $30^{\circ}\text{C}$  متغیر است و کمی بیشتر از دمای مرطوب محیط است به گونه‌ای که کمترین مقدار آن مربوط به ساعت ۱۰ و بیشترین مقدار آن در محدوده ساعت ۱۲ تا ۲۲ اتفاق می‌افتد. اگر چه دمای آب سرد خروجی از مخزن (ورودی به ساختمان) تقریباً ثابت است و در محدوده  $27^{\circ}\text{C}$  تا  $30^{\circ}\text{C}$  تغییر می‌کند، ولی دمای آب برگشتی از ساختمان (ورودی به مخزن) تغییرات محسوس‌تری دارد و بیشترین مقدار آن در ساعت ۷ زمان شروع سیستم سرمایشی رخ می‌دهد.

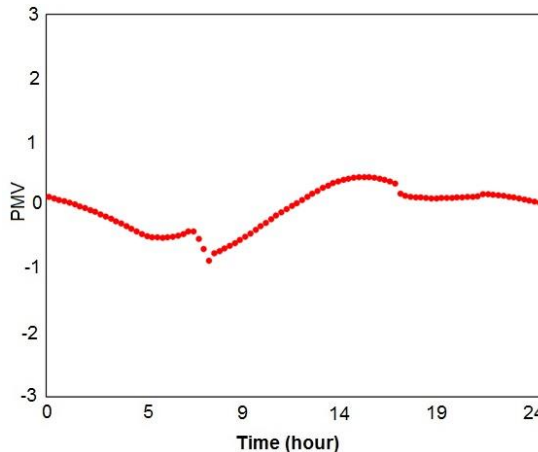


شکل ۱۵- عملکرد سیستم پیشنهادی در روز طراحی شهر بندرعباس

ارسالی به ساختمان حداقل ۲ تا  $3^{\circ}\text{C}$  کمتر از دمای آب خروجی از برج می‌باشد که مزیت استفاده از مخزن ذخیره حرارتی را مخصوصاً در ساعات اوج مصرف نشان می‌دهد. همچنین، با توجه به شکل (۱۳) می‌توان دریافت که در تمامی ساعات حضور افراد، شاخص آسایش حرارتی در بازه ۱- تا +۱ قرار دارد و به عبارتی، شرایط آسایش حرارتی برقرار شده است. ضمن اینکه حداکثر میزان شاخص آسایش حرارتی بین ساعت ۱۵ الی ۱۶ و حداقل آن در حدود ساعت ۷ اتفاق افتاده است.



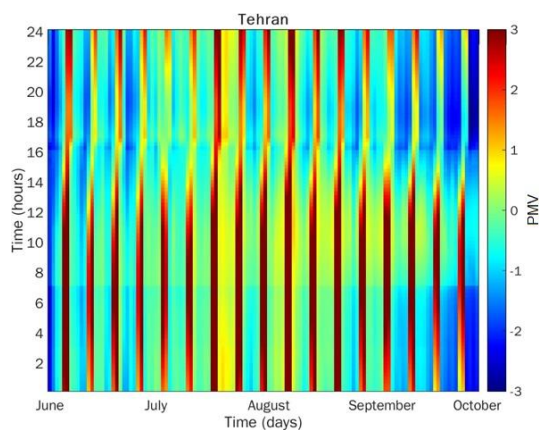
شکل ۱۲- عملکرد سیستم پیشنهادی در روز طراحی شهر شیراز



شکل ۱۳- شاخص آسایش حرارتی در روز طراحی شهر شیراز مطابق شکل (۱۴)، حداکثر ظرفیت حرارتی برج خنک‌کن و سیستم سرمایش به ترتیب بین ۱۱ و  $12/5$  کیلووات است که مقدار حداکثر ضریب عملکرد ۱۰ و ۱۴ را به ترتیب برای برج خنک‌کن و سیستم سرمایشی نشان می‌دهد.

شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه سیستم سرمایشی در روزهای تعطیل و در خارج از ساعت اداری خاموش است، طبیعتاً شاخص آسایش حرارتی در این بازه های زمانی ممکن است خارج از محدوده قابل قبول آسایش حرارتی باشد.

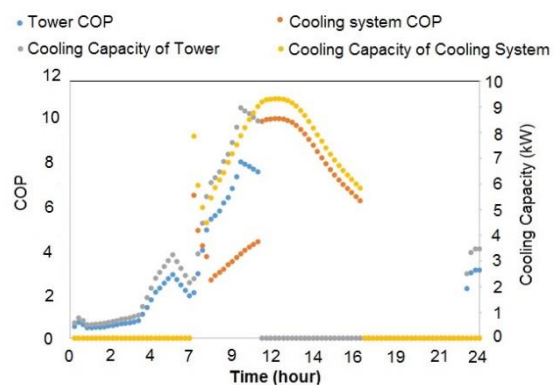
همان طور که در شکل (۱۷) نشان داده شده است سیستم سرمایشی حاضر شرایط آسایش حرارتی را در تمامی ماهها در ساعات اداری یعنی از ساعت ۸ تا ساعت ۱۷ را در شهر تهران تامین کرده است. البته با توجه به پیش سرمایش فضا که از ساعت ۷ تا ۸ صبح صورت می گیرد می توان مشاهده کرد که در برخی از روزهای اداری نظیر اوایل و اواسط ماه June (نیمه دوم خردادماه) پارامتر آسایش حرارتی کمی کمتر از ۱- است. مطابق شکل در روزهای تعطیل با توجه به خاموش بودن سیستم در این روزها آسایش حرارتی تامین نشده و پارامتر PMV خارج از محدوده آسایش است. بنابراین استفاده از سیستم طراحی شده در اقلیم معتدل و مرطوب عملکرد خوبی دارد و آسایش حرارتی ساکنان را تامین می نماید.



در شهر تهران PMV شکل ۱۷- ارزیابی فصلی پارامتر در شکل (۱۸) پارامتر آسایش حرارتی در فصل گرما در شهر تبریز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد اگرچه سیستم حاضر در ماههای July و August (اواسط تیرماه تا اواسط شهریورماه) در ساعات اداری شرایط آسایش حرارتی را تامین می نماید ولی در نیمه ابتدایی ماه June (نیمه دوم خرداد ماه) و تقریباً کل ماه September (تقریباً از اواسط شهریور ماه تا اواسط مهرماه) پارامتر PMV کمتر از مقدار ۱- است که نشان می دهد شرایط آسایش حرارتی تامین نشده است و باید ساعات کارکرد سیستم سرمایشی تغییر کند.

با توجه به نتایج حاصل از این سیستم که در شکل (۱۵) به آن اشاره شد، دمای آب سرد تولید شده توسط برج خنک کن بیشتر از دمای مورد نیاز سیستم سرمایش سقفی است. در نتیجه، نتایج حاصل برای پارامتر آسایش حرارتی نشان می دهد که در تمامی ساعات حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی بیشتر از ۱+ است و به عبارتی، سیستم سرمایشی پیشنهادی قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی ساکنان نیست.

شکل (۱۶) ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی برج خنک کن و سیستم سرمایشی را در روز طراحی برای شهر بندرعباس نشان می دهد. مطابق شکل (۱۶) حداکثر ظرفیت حرارتی برج خنک کن و سیستم سرمایش به ترتیب برابر با ۹ و ۹/۳ کیلووات است. همچنین حداکثر ضریب عملکرد برج خنک کن و سیستم سرمایشی به ترتیب در حدود ۸ و ۱۰ می باشد.



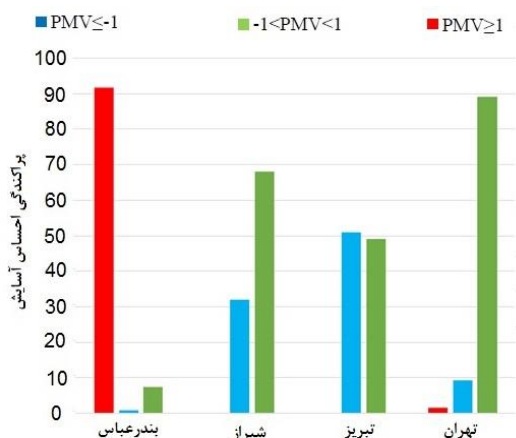
شکل ۱۶- ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایشی برج خنک کن و سیستم سرمایش در طول روز طراحی در شهر بندرعباس

## ۶-۲- بررسی عملکرد سیستم سرمایشی

### پیشنهادی در فصل گرما

در این بخش، عملکرد سیستم سرمایش پیشنهادی در فصل گرما گرما از ۱۱ خرداد ماه (1st June) تا ۹ مهر ماه (1st October)، از لحاظ تامین شرایط آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل های (۱۷) تا (۱۹)، نمودار ارزیابی آسایش حرارتی برای سیستم سرمایشی مذکور در شهرهای مختلف با توجه به معیار PMV در فصل گرما ارزیابی شده است. با توجه به اینکه گام زمانی لحاظ شده برای ارائه شاخص آسایش حرارتی ۱۵ دقیقه می باشد، در بازه مورد بررسی ۱۱۷۱۲ عدد برای این پارامتر گزارش شده است که جهت نمایش این تعداد داده، نمودار فرشی انتخاب

این شهرها در سایر ساعات حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده کمتر از ۱- قرار دارد که نشان می‌دهد می‌توان با تغییر زمان کارکرد سیستم سرمایش در این شهرها شرایطی را فراهم کرد تا در تمامی زمان حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول قرار گیرد.

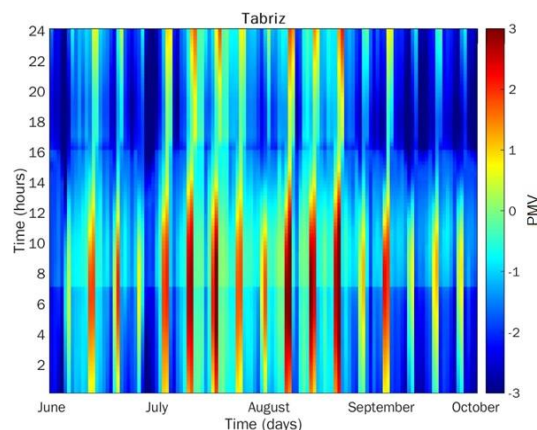


شکل ۲۰- ارزیابی پارامتر PMV در ساعات حضور افراد

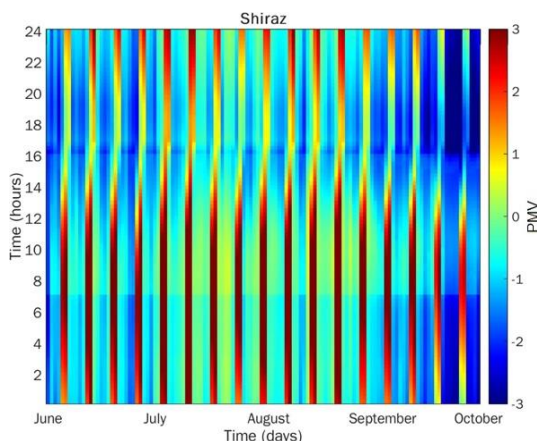
## ۷- نتیجه گیری

مقاله حاضر رویکرد استفاده از سیستم ذخیره‌سازی انرژی در حالت به‌کارگیری برج خنک‌کن به عنوان منبع سرمایشی سیستم سرمایش سقفی را مورد ارزیابی قرار داده است. سیستم‌های ذخیره انرژی حرارتی می‌توانند نیاز به انرژی در زمان بیشینه تقاضا را کاهش دهند. در این سیستم، انرژی در زمان غیر اوج ذخیره می‌شود و در زمان اوج مصرف، امکان استفاده از این انرژی برای مصرف کننده فراهم می‌گردد. با توجه به اینکه برج خنک‌کن به عنوان تنها منبع سرمایش در این سیستم عمل می‌کند و عملکرد آن به شرایط محیطی بستگی دارد، عملکرد سیستم سرمایشی مذکور برای چهار شهر تهران، شیراز، تبریز و بندرعباس که به ترتیب به نمایندگی از اقلیم‌های معتدل و مرطوب، گرم و خشک، سرد و گرم و مرطوب انتخاب شده‌اند، بررسی شده است. نتایج نشان داد که با ذخیره‌سازی آب سرد تولیدی توسط برج خنک‌کن در ساعات غیر اوج مصرف و استفاده از این آب سرد در ساعات اوج مصرف می‌توان ضریب عملکرد سیستم سرمایشی را افزایش داد. همچنین، با استفاده از این سیستم در بیشتر ساعات کارکرد سیستم سرمایش، دمای آب خروجی از مخزن و ارسالی به سیستم سرمایش سقفی حداقل ۲ تا ۳°C کمتر از دمای آب خروجی از برج می‌باشد که مزیت استفاده از مخزن

همچنین، برای بررسی تامین شرایط آسایش حرارتی سیستم سرمایشی پیشنهادی در اقلیم گرم و خشک به ارزیابی پارامتر آسایش حرارتی در شهر شیراز در ماه‌های گرم سال پرداخته شده است. مطابق شکل (۱۹) این سیستم می‌تواند شرایط آسایش حرارتی را تا اواسط ماه September (اواخر شهریورماه) تامین نماید.



شکل ۱۸- ارزیابی فصلی پارامتر PMV در شهر تبریز



شکل ۱۹- ارزیابی فصلی پارامتر PMV در شهر شیراز

در شکل (۲۰) به پراکندگی شاخص احساس آسایش افراد برای سیستم سرمایش در نظر گرفته شده در ساعات کاری در چهار اقلیم مختلف پرداخته شده است. برای این منظور، شاخص آسایش حرارتی در سه گروه بررسی شده است. محدوده قابل قبول که پارامتر PMV در محدوده  $1 \pm$  است و دو محدوده که پارامتر کمتر از ۱- و بیشتر از ۱+ است. مطابق نتایج حاصل شده، این سیستم در ۹۰٪ زمان حضور افراد در شهر تهران قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی است و در این شهر در ۷٪ زمان حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی عددی کمتر از ۱- را دارد. اگرچه طبق نتایج بیان شده محدوده قابل قبول آسایش برای شهرهای تبریز و شیراز در حدود ۵۰ و ۷۰٪ زمان حضور افراد است، ولی در

حدود ۵۰ و ۷۰٪ زمان حضور افراد است، ولی در این شهرها در سایر ساعات حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده کمتر از ۱- قرار دارد که نشان می‌دهد می‌توان با تغییر زمان کارکرد سیستم سرمایش در این شهرها شرایطی را فراهم کرد تا در تمامی زمان حضور افراد پارامتر آسایش حرارتی در محدوده قابل قبول قرار گیرد.

ذخیره حرارتی را مخصوصاً در ساعات اوج مصرف نشان می‌دهد. همچنین، نتایج تحلیل آسایش حرارتی فصلی نشان می‌دهد که این سیستم در ۹۰٪ زمان حضور افراد در شهر تهران قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی است و در این شهر در ۷٪ زمان حضور افراد، شاخص آسایش حرارتی مقداری کمتر از ۱- را دارد. اگرچه طبق نتایج بیان شده محدوده قابل قبول آسایش برای شهرهای تبریز و شیراز در

## مراجع

- [1] L. Yang, H. Yan, and J.C. Lam, "Thermal comfort and building energy consumption implications—a review", *Applied Energy*, Vol. 115, February 2014, pp.164-173.
- [۲] سید علیرضا ذوالفقاری، مهران سعادت‌نی نسب و الهه نوروزی جاجرم، «بررسی تأثیر استفاده از نماهای دویپوسته سبز بر مصرف انرژی ساختمانهای بلندمرتبه در شرایط اقلیمی تهران»، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۷، شماره ۵۶، ۱۳۹۸، صفحه ۵۱-۶۱.
- [3] M. Nasrabadi and DP. Finn, "Analysis of a low-temperature small approach open cooling tower integrated with radiant cooling and displacement ventilation for space conditioning in temperate climates", *Advances in Building Energy Research*, Vol.19, July 2022, pp.1-26.
- [4] Y. Yau and B. Rismanchi, "A review on cool thermal storage technologies and operating strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, no. 1, January 2012, pp. 787-797.
- [5] I. Dincer and M. Rosen, "Energy storage systems," *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd Chichester, September 2021.
- [6] X. Song, L. Liu, T. Zhu, S. Chen, and Z. Cao, "Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 133, March 2018, pp. 613-621.
- [7] R. McDowall, "Fundamentals of HVAC systems: SI edition", Academic Press, 2007.
- [8] B. Costelloe and D. Finn, "Indirect evaporative cooling potential in air–water systems in temperate climates", *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 6, July 2003, pp. 573-591.
- [9] A. Hasan and K. Siren, "Theoretical and computational analysis of closed wet cooling towers and its applications in cooling of buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 34, No. 5, June 2002, pp. 477-486.
- [10] A. Hasan, M. Vuolle, K. Sirén, R. Holopainen, and P. Tuomaala, "A cooling tower combined with chilled ceiling: system optimisation," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 2, No. 3, July 2007, pp. 217-224.
- [11] P. Sprecher and F. Tillenkamp, "Energy saving systems in building technology based on concrete-core-cooling", *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 24, No. 1, January 2003, pp. 29-34.
- [12] B. Costelloe and D. Finn, "Heat transfer correlations for low approach evaporative cooling systems in buildings", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 1, January 2009, pp. 105-115.
- [13] M. Nasrabadi, and D.P. Finn, "Performance analysis of a low approach low temperature direct cooling tower for high-temperature building cooling systems", *Energy and Buildings*, Vol. 84, December 2014, pp.674-689.
- [۱۴] سعید رهگذر، مازیار دهقان، ابوالفضل پوررجیبیان و حمیدرضا حقگو، «ارزیابی فنی-اقتصادی بهره‌گیری از سامانه ذخیره‌سازی یخ بر اساس الزامات جدید پیش‌نویس ویرایش چهارم مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان»، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۸، شماره ۶۳، ۱۳۹۸، صفحه ۷۲-۶۵.
- [15] F. Bagheri, V. Mokarizadeh, and M. Jabbar, "Developing energy performance label for office buildings in Iran", *Energy and Buildings*, Vol. 61, June 2013, pp. 116-124.
- [16] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte, and J. Glazer. "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program", *Energy and Buildings*, Vol. 33, No. 4, April 2001, pp.319-331.

- [17] U.S. DOE. Energyplus v8.1.0.009. California, USA, 2013. URL <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [18] EnergyPlus Input/Output Reference. EnergyPlus Documentation. LBL, March 2018.
- [19] P.Haves, B. Ravache, and M. Yazdani. "Accuracy of HVAC Load Predictions: Validation of EnergyPlus and DOE-2 using FLEXLAB Measurements. Lawrence Berkeley National Laboratory", April 2020. DOI:10.20357/ B7H88D.
- [20] EnergyPlus Engineering Reference. EnergyPlus Documentation. LBL, October 2013.
- [۲۱] مهدی نصرآبادی و فرزانه ربانی، « بررسی عوامل تاثیرگذار بر ناحیه ترموکلین در مخزن ذخیره انرژی حرارتی»، مجله مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۹، شماره ۶۴، اردیبهشت ۱۴۰۰، صفحه ۱۵-۲۵.
- [22] JD. Feng, S. Schiavon, and F.Bauman, "Cooling load differences between radiant and air systems", Energy and Buildings. Vol. 65, October 2013, pp. 310-21.
- [23] M. Lain and J. Hensen, "Combination of low energy and mechanical cooling technologies for buildings in central Europe". In 5th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, France, 2004, pp. 1-6.
- [24] M. Lain, F. Drkal, J. Hensen, V. Zmrhal, "Low energy cooling techniques for retrofitted office buildings in central Europe", Ventilation and Retrofitting Prague, AIVC Brussels. Vol.5, September 2004, pp.79-84.
- [25] I. Doebber, M. Moore and M.Deru, "Radiant slab cooling for retail". ASHRAE Journal. Vol.52, No. 12, December 2010, pp. 28.
- [26] G. Dunn, and I. Knight, "Small power equipment loads in UK office environments", Energy and buildings, Vol. 37, No. 1, January 2005, pp.87-91.
- [27] CEN. CEN (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION), EN 13779:2007 Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems. Brussels (Belgium), 2007.
- [28] Lighting for LEED Application guide for sustainable offices, Koninklijke Philips Electronics N.V, LEED/APPGUIDE08/12, 2012.
- [29] P.O. Fanger, "Assessment of man's thermal comfort in practice. Occupational and Environmental Medicine", Vol. 30, No. 4, October 1973, pp.313-324.
- [30] ASHRAE. "ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers", Inc., Atlanta, USA, SI edition, 2013.
- [31] S.Wei, M. Li, W. Lin and Y. Sun, "Parametric studies and evaluations of indoor thermal environment in wet season using a field survey and PMV-PPD method", Energy and Buildings, Vol.42, No. 6, June 2010, pp.799-806.
- [32] V. Wylen and G. John, "Fundamentals of thermodynamics", ed: India, 2002.