



تحلیل عملکرد مدل سه نقطه‌ای مخزن ذخیره حرارتی جهت بکارگیری در سیستم سرمایش تابشی ساختمان

رضا شیخی کاریزکی¹، مهدی نصرآبادی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* m.nasrabadi@birjand.ac.ir, 97175615

چکیده

سهم انرژی مورد نیاز برای ساختمان‌ها در حدود 40 درصد از مصرف کل سالانه است که قسمت عمده مصرف انرژی در ساختمان‌ها به سیستم‌های تهویه مطبوع اختصاص دارد. در تحقیق حاضر عملکرد مخزن ذخیره حرارتی با مدل سه نقطه‌ای در سیستم سرمایش تابشی برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز مورد بررسی قرار گرفته شده است. بدین منظور 4 حالت مختلف لحاظ شده است که در حالت اول چیلر الکتریکی بدون مخزن ذخیره، آب سرد مورد نیاز سیستم سرمایش تابشی را تامین می‌کند. در حالت دوم چیلر الکتریکی با مخزن ذخیره به سیستم سرمایش تابشی متصل است. در حالت سوم چیلر حذف شده است و مخزن ذخیره حرارتی محسوس بطور مستقیم به برج خنک‌کن جهت شارژ مخزن متصل است و در حالت چهارم سیستم سرمایش همانند حالت سوم است با این تفاوت که در حالت سوم برج خنک‌کن در ساعت‌های کم باری مخزن ذخیره را شارژ می‌کند درحالی‌که در حالت چهارم کارکرد برج خنک‌کن جهت شارژ مخزن در ساعت‌های میان باری و پر باری بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که از نظر مصرف انرژی حالت سوم کمترین مقادیر را داراست که برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز به ترتیب 3، 2/9 و 2/8 گیگاژول می‌باشد. تحلیل آسایش حرارتی در حالت سوم نشان می‌دهد که برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز به ترتیب 22، 83 و 3 درصد آسایش افراد را می‌تواند تامین کند که تبریز به دلیل دارا بودن اقلیم آب و هوایی معتدل و خشک بهترین شهر برای تامین آسایش حرارتی افراد است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم سرمایش تابشی در حالت سوم در سه شهر مورد بررسی می‌تواند هزینه‌ی مصرف انرژی را تا حدود 300 تا 600 هزار ریال در ماه نسبت به سیستم مرسوم کاهش دهد.

کلیدواژه‌گان: برج خنک‌کن، مخزن ذخیره حرارتی، سرمایش تابشی، مصرف انرژی، آسایش حرارتی، تحلیل اقتصادی

Performance analysis of the three-node model thermal storage tank for application in radiant cooling building systems

Reza Sheikhi Karizaki¹, Mehdi Nasrabadi^{2*}

1- Master's student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran, m.nasrabadi@birjand.ac.ir

Received: 15 April 2024 Accepted: 21 January 2025

Abstract

The share of energy required for buildings is approximately 40 percent of the total annual consumption, with the majority of energy consumption in buildings allocated to HVAC systems. In the current study, the performance of a thermal energy storage tank with a three-point model in the radiant cooling system for three cities, Tehran, Tabriz, and Ahvaz, has been investigated. For this purpose, four different case have been considered: in the first case, an electric chiller without a chilled water storage tank supplies the radiant cooling system's cooling demand; in the second case, an electric chiller with a storage tank is connected to the radiant cooling system. In the third case, the chiller is eliminated, and the thermal energy storage tank is directly connected to the cooling tower for charging the tank, and in the fourth case, the cooling system is similar to the third case with the difference that in the third case, the cooling tower charges the storage tank

during low load hours, while in the fourth case, the operation of the cooling tower for charging the tank has been investigated during medium and high load hours. The modeling results indicate that in terms of energy consumption, the third case has the lowest values, which is 3, 2.9, and 2.8 GJ for Tehran, Tabriz, and Ahvaz, respectively. Thermal comfort analysis in the third case shows that it can provide 22%, 83%, and 3% of people's comfort for Tehran, Tabriz, and Ahvaz, respectively, with Tabriz being the best city for providing thermal comfort due to its moderate and dry climate. Furthermore, simulation results show that the radiant cooling system in the third case can reduce energy consumption costs by approximately 300,000 to 600,000 Iranian rials per month compared to the conventional system in the three cities under consideration.

Keywords: Cooling tower, thermal storage tank, radiant cooling, energy consumption, thermal comfort, economic analysis

1- مقدمه

شاید یکی از بزرگترین دغدغ‌های چند دهه اخیر جامعه بشری را مشکلات محیط زیست و مسئله‌ی تمام شدن ذخایر انرژی‌های فسیلی دانست. در حال حاضر یکی از معضلات اصلی جهان امروزه تامین انرژی مورد نیاز است [1]. سهم انرژی مورد نیاز برای ساختمان‌ها در حدود 40 درصد از مصرف کل سالانه است. طبق تخمین‌ها از سال 2003 تا 2030 مصرف انرژی در حدود 71 درصد افزایش می‌یابد که به دنبال آن تولید گازهای گلخانه‌ای بیشتر می‌شود بنابراین به دلیل گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده به دلیل وابسته نبودن و تولید نکردن گازهای گلخانه‌ای، انتخاب خوبی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی است [2]. بر اساس گزارش دپارتمان انرژی ایالت متحده آمریکا، 28 درصد انرژی مصرفی مربوط به حمل‌ونقل، 31 درصد صنعت و 41 درصد ساختمان‌ها می‌باشد [3]. ساختمان‌های اداری کوچک در حدود 47 درصد از کل مصرف انرژی ساختمان‌ها را در آمریکا شامل می‌شوند، که با مقاوم‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در این ساختمان‌ها می‌توان انرژی قابل توجهی را ذخیره کرد [4].

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 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 [5]. 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 (مخازن ذخیره انرژی محسوس یا نهان) می‌تواند نقش مهمی در رفع نیازهای انرژی، بخصوص در ساختمان‌ها ایفا کنند. همچنین مخازن ذخیره انرژی با ذخیره‌سازی انرژی در ساعت غیرپیک مصرف و استفاده از آن در ساعت‌های پیک می‌تواند هزینه‌ی مصرف انرژی را به صورت چشم‌گیری کاهش دهند [6].

فانگ¹ و همکاران در یک سیستم تهویه مطبوع خورشیدی که شامل سرمایش تشعشعی، سرمایش جذبی و رطوبت‌زدا با ماده خشک‌کن است به بررسی دو نوع رایج سرمایش از سقف، تیرهای سرمایش فعال² و تیرهای سرمایشی غیرفعال³ پرداخته است و نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سیستم سرمایشی غیرفعال نسبت به فعال در حدود 20/3 درصد انرژی کمتری مصرف

می‌کند [7]. خان⁴ و همکاران به بررسی یک سیستم سرمایش تابشی متصل به یک سیستم کمکی که با فن‌کوئل ساختمان را سرد می‌کند، پرداخته‌اند. با شبیه‌سازی عددی این سیستم به این نتیجه رسیدند که سیستم سرمایش تابشی می‌تواند 30 درصد از انرژی مصرفی را نسبت به سیستم‌های تهویه هوای مرسوم کاهش دهد [8]. ژو⁵ و همکاران به ارزیابی آسایش حرارتی برای سیستم‌های تابشی با تمرکز روی گرمایش از کف، سرمایش از سقف و گرمایش و سرمایش از دیوار پرداخته‌اند. به‌وسیله‌ی نظرسنجی افراد در یک ساختمان اداری در شانگهای، ارزیابی آسایش حرارتی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که تابش غیرممتقارن، آسایش حرارتی افراد را به میزان قابل توجهی بالا برده است و همچنین پس از بررسی دو ناحیه، نزدیک پنجره‌های خارجی و قسمت داخلی ساختمان، به این نتیجه رسیدند که آرای احساس حرارتی افراد⁶ (TSV) در نزدیک پنجره‌ها و دیوارهای خارجی به‌اندازه 0/5 واحد نسبت به ناحیه داخلی ساختمان بیشتر شده است. افرادی که در ناحیه بیرونی قرار داشتند، به دلیل قرار گرفتن بدن آن‌ها در معرض تابش عمودی و افقی، براساس نتایج نظرسنجی‌ها، میانگین آرای پیش بینی شده⁷ (PMV) آن‌ها به مقدار 0/1 واحد بیشتر از افرادی بود که در ناحیه داخلی قرار گرفته بودند [9].

رادا⁸ و همکاران به بررسی اتصال مخزن آب گرم، چیلر و یک کلکتور خورشیدی در یک سیکل سرمایش جذبی خورشیدی در دو حالت پرداختند، حالت اول که فقط مخزن آب گرم تامین‌کننده‌ی گرمای ورودی به چیلر است و حالت دوم که مخزن آب گرم و کلکتور خورشیدی هر دو تامین‌کننده آب گرم هستند. نتایج نشان می‌دهد که حالت دوم عملکرد بهتری دارد زیرا کسر خورشیدی در حالت دوم 86 درصد و در حالت اول 84 درصد است [10]. نصرآبادی و همکاران مدل اختلاف محدود یک‌بعدی با استفاده از روش ضمنی ارائه دادند. توزیع دما در مخزن ذخیره انرژی در صورتی که متصل به بار حرارتی و کلکتور خورشیدی نباشد خطی است و در شرایطی که مخزن به بار حرارتی متصل گردد تغییرات دما روندی غیرخطی دارد [11]. نصرآبادی و ربانی به بررسی ناحیه ترموکلاين (ناحیه واسط بین مناطق گرم و سرد) در یک مخزن ذخیره حرارتی آب سرد پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد، اگرچه در ساعت‌های اولیه شیب دما بین مناطق گرم و سرد بزرگ بوده و ضخامت ترموکلاين کوچک است، اما با گذشت زمان میزان شیب دما کاهش یافته و ضخامت ترموکلاين افزایش می‌یابد [12]. نصرآبادی و فین به بررسی عملکرد سیستم سرمایشی متصل به برج خنک‌کن با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار انرژی پلاس پرداختند. برج خنک‌کن، آب سرد مورد استفاده برای سیستم تابشی و تهویه

5. Zhou
6. Thermal Sensation Vote
7. Predicted Mean Vote
8. Reda

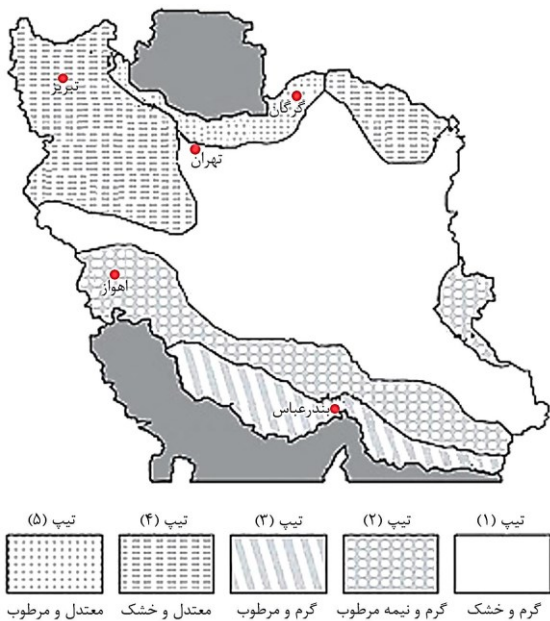
1. Fong
2. Active Cooling Beam
3. Passive Cooling Beam
4. Khan

جهت بررسی مناطق در زمستان، تنها عامل مهم، حداقل درجه حرارت خشک زمستانی می‌باشد. با توجه به تقسیم‌بندی‌های تابستانی، نمونه گروه‌های زمستانی می‌توانند با کمی چشم‌پوشی و تطبیق به گروه‌های خاص تابستانی تعلق گیرند. در جدول 1 تقسیم‌بندی زمستانی و تابستانی ارائه شده است، همچنین شکل 1 بصورت شماتیک نقشه ایران و تقسیم‌بندی شهرها را در 5 تیپ مختلف نشان می‌دهد [17].

تحقیقات پیشین در زمینه استفاده از سیستم‌های سرمایش تابشی نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم‌ها در مناطق مرطوب به علت احتمال تقطیر آب در سطح با محدودیت مواجه است [18]، بنابراین در این تحقیق عملکرد سیستم در سه شهر اهواز، تهران و تبریز که به ترتیب معرف شرایط آب‌وهوایی گرم و نیمه مرطوب، گرم و خشک و معتدل و خشک هستند، در چهار ماه گرم سال، از 11 خرداد (1st June) تا 9 مهر (1st October)، مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 1 تقسیم‌بندی کلی اقلیم تابستانی و زمستانی [17]

تیپ‌بندی	اقلیم تابستانی	اقلیم زمستانی	شهر
تیپ 1	گرم و خشک	سرد	تهران و...
تیپ 2	گرم و نیمه مرطوب	معتدل	اهواز و...
تیپ 3	گرم و مرطوب	گرم	بندر عباس و...
تیپ 4	معتدل و خشک	خیلی سرد	تبریز و...
تیپ 5	معتدل و مرطوب	سرد	گرگان و...



شکل 1 نقشه تقسیمات اقلیمی ایران [17]

3- مدل ساختمان

جابجایی را تامین می‌کند که پس از بررسی برای چهار اقلیم آب و هوایی به این نتیجه رسیدند که این سیستم سرمایشی، آسایش حرارتی افراد را تا 80 درصد زمان حضور آن‌ها، تامین می‌کند. همچنین سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم سرمایش هواساز حجم متغیر¹ (VAV) می‌تواند تا حدود 60 درصد مصرف انرژی را کاهش دهد. از دیگر نتایج می‌توان به عملکرد بهتر سرمایش از کف نسبت به سرمایش از سقف و تاثیر مستقیم هوای محیط به عملکرد برج خنک‌کن اشاره کرد [13-14]. نصرآبادی سیستم سرمایش تابشی متصل به برج خنک‌کن و سیستم سرمایشی فن‌کوئل را مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده است. عملکرد این سیستم‌ها از نظر مصرف انرژی و آسایش حرارتی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که سیستم سرمایش سقفی در اتصال با برج خنک‌کن برای شهرهای تهران و تبریز می‌تواند آسایش حرارتی را فراهم کند و مصرف انرژی را در حدود 65 درصد برای شهر تهران و 50 درصد برای شهر تبریز در مقایسه با سیستم فن‌کوئل کاهش دهد، ولی برای شهر اهواز اگرچه کاهش مصرف انرژی چشم‌گیر است ولی سیستم سرمایش سقفی نمی‌تواند آسایش حرارتی را در این شهر تامین کند [15]. ربانی و همکاران به بررسی عملکرد سیستم سرمایش سقفی‌ای، پرداختند که برج خنک‌کن تنها منبع تولید آب سرد این سیستم است و این سیستم را در شهرهای تهران، شیراز، تبریز و بندرعباس شبیه‌سازی کردند. بیشینه ضریب عملکرد سیستم سرمایشی برای چهار شهر ذکر شده به ترتیب 8/5، 14، 12/5، 10 حاصل شده است. نتایج نشان داده است که این سیستم در شهر تهران قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی در 90 درصد از ساعات‌های اداری است [16].

در این تحقیق عملکرد سیستم سرمایش تابشی در حالت سرمایش از سقف در اتصال به برج خنک‌کن، مخزن ذخیره حرارتی و چیلر در زمان‌های کارکرد مختلف (کم باری و پر باری مصرف برق) در شهر تهران، تبریز و اهواز مورد بررسی قرار گرفته است. در این ارزیابی مخزن ذخیره حرارتی محسوس در متلب مدل‌سازی شده است و در حالات مختلف در اتصال به سیستم سرمایش تابشی در ساعات‌های اداری مورد بررسی قرار گرفته است.

به عنوان نوآوری پژوهش می‌توان به مدل‌سازی مخزن ذخیره حرارتی محسوس به روش سه نقطه‌ای در نرم‌افزار متلب، در نظر گرفتن اتلافات ناشی از خورشید در مخزن، بررسی عملکرد سیستم سرمایشی پیشنهادی در زمان‌های شارژ مختلف و تحلیل اقتصادی سیستم اشاره کرد.

2- تقسیم بندی اقلیمی ایران

ایران به دلیل داشتن عوامل طبیعی مختلف مانند دریا، کویر، کوهستان و جنگل دارای آب و هوای متفاوت می‌باشد. از این رو در زمان‌های متفاوت در سال شرایط اقلیمی متفاوتی را می‌توان شاهد بود و این تغییرات تاثیر مستقیم بر عملکرد برج خنک‌کن دارند [17].

عوامل موثر در تقسیم‌بندی تابستانی عبارتند از: درجه حرارت خشک² (DB)، درجه حرارت مرطوب³ (WB)، رطوبت نسبی⁴ (RH) و مقدار رطوبت⁵ (W). با مشخص شدن دو عامل از عوامل فوق، بقیه پارامترها مشخص می‌شود. بنابراین تقسیم‌بندی طبق دو عامل مهم می‌تواند صورت پذیرد: الف) تفاوت در درجه حرارت. ب) تفاوت در رطوبت [17].

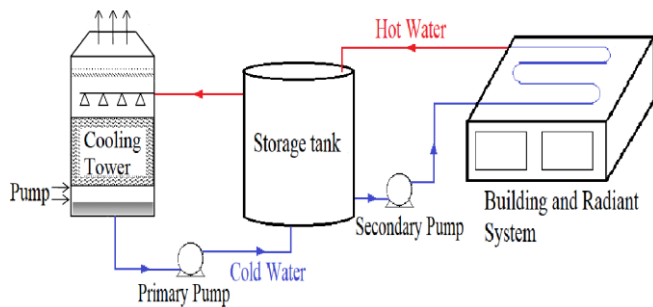
4. Relative Humidity
5. Moisture Content

1. Variable Air Volume
2. Dry Bulb
3. Wet Bulb

0/05	بتن با پوکه	
0/4	لایه هوا	
0/1	بتن و لوله‌های سرمایشی	
0/02	گچ و خاک	
0/005	گچ	
0/02	سنگ گرانیت	
0/02	ملات	
0/2	آجر	دیوار
0/02	گچ و خاک	
0/005	گچ	

4- سیستم‌های سرمایشی

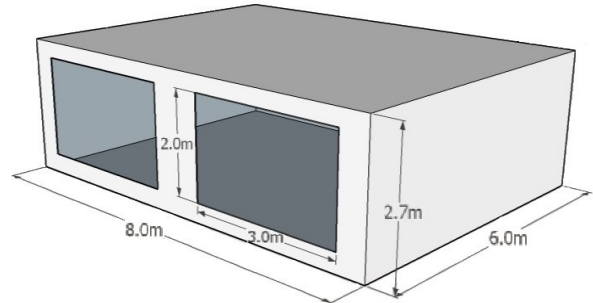
در این تحقیق سیستم سرمایش تابشی به صورت لوله‌های تعبیه شده در بتن است که این سیستم به عنوان سیستم‌های سرمایشی فعال حرارتی (TABS) شناخته می‌شوند [20]. شماتیک این سیستم سرمایشی و اجزا آن که شامل برج خنک‌کن، پمپ و فن‌ها می‌باشد، در شکل 3 نشان داده شده است. در این تحقیق بر اساس استاندارد قطر لوله‌های سرمایش تابشی 0/015875 متر و فاصله لوله‌ها از هم 0/15 متر است [21] و طول کل لوله‌ها نیز با توجه به ابعاد اتاق محاسبه شده است.



شکل 3 سیستم سرمایش تابشی پیشنهادی

جهت مقایسه عملکرد سیستم‌های سرمایشی تابشی پیشنهادی با سیستم‌های تابشی متداول، سیستم سرمایش تابشی متصل به چیلر نیز مدلسازی شده است. این سیستم تهویه مطبوع که در حالت اول از چیلر و در حالت دوم علاوه بر چیلر، از مخزن ذخیره جهت تامین آب سرد برای سرمایش ساختمان استفاده می‌کند. شماتیک سیستم سرمایش تابشی متداول به همراه منابع تامین‌کننده سرمایش و تجهیزات بکار رفته در این سیستم در شکل 4 و سیستم سرمایش تابشی همراه با چیلر و مخزن ذخیره انرژی در شکل 5 نشان داده شده است.

مدل ساختمان مورد بررسی در این تحقیق، ساختمان استاندارد CASE600 است که دارای یک ناحیه حرارتی به مساحت 48 متر مربع و ارتفاع 2/7 متر است. این ساختمان دارای دو پنجره است که هر کدام به مساحت 6 متر مربع در ضلع جنوبی ساختمان قرار گرفته‌اند. در شکل 2 نمای بیرونی ساختمان نشان داده شده است.



شکل 2 نمای بیرونی ساختمان از دید جنوب شرقی

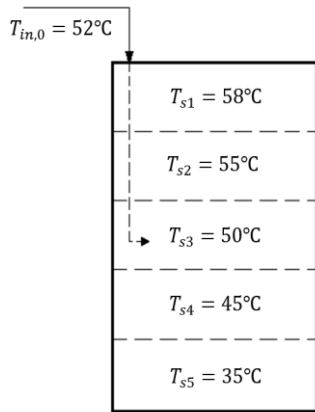
مواد و مصالح به کار رفته در ساختمان مطابق جدول 2 و جدول 3 است که در این جداول مشخصات حرارتی، ضخامت و ترتیب قرارگیری مواد به کار رفته در ساختمان از سطح خارجی به سطح داخلی آورده شده است [19].

جدول 2 جنس مصالح به کار رفته در ساختمان [19]

چگالی (kgm^{-3})	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	مواد و مصالح
1700	1000	0/25	قیرگونی
2110	1000	1/15	آسفالت
1900	840	1	آجر
2000	920	1/15	ملات
2300	1000	1/75	بتن
1300	840	0/34	بتن با پوکه
1/169	1004	0/3	لایه هوا
1000	840	1/15	گچ و خاک
1300	1000	0/7	گچ
2500	840	2/9	سنگ گرانیت
3000	1000	1/4	موزاییک

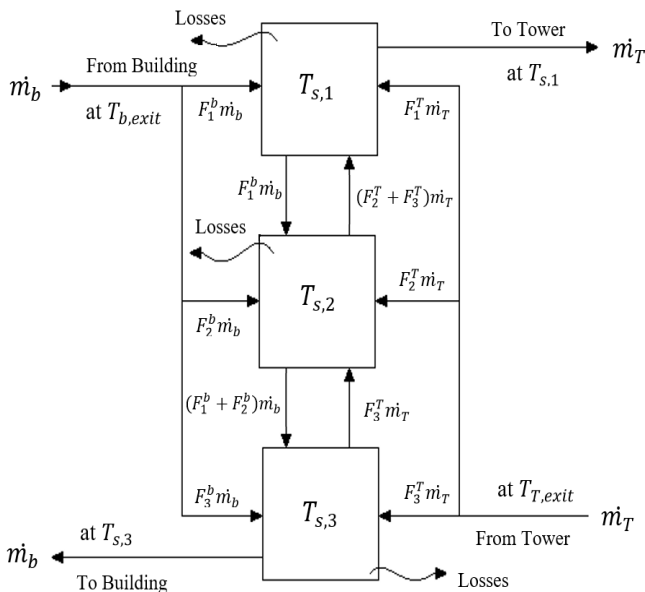
جدول 3 ترتیب قرار گرفتن لایه‌ها و ضخامت آنها [19]

اجزاء ساختمان	لایه‌ها	ضخامت (m)
	بتن با پوکه	0/1
کف	ملات	0/02
	موزاییک	0/03
	آسفالت	0/04
سقف	قیرگونی	0/03
	ملات	0/02



شکل 6 مخزن فرضی پنج نقطه‌ای که نحوه توزیع آب ورودی را نشان می‌دهد [22]

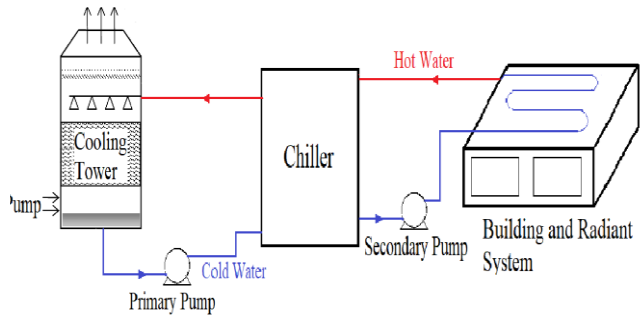
همانطور که در شکل 7 مدل سه نقطه‌ای مخزن نشان داده شده است، جریان همیشه از مخزن به سمت ساختمان از پایین‌ترین گره (گره 3) و جریان از مخزن به سمت برج خنک‌کن از بالاترین گره (گره 1) خارج می‌شود. جریان برگشتی از ساختمان به گره‌ای وارد می‌شود که نزدیک‌ترین دما و کمتر از دمای جریان برگشتی از ساختمان را داراست [22].



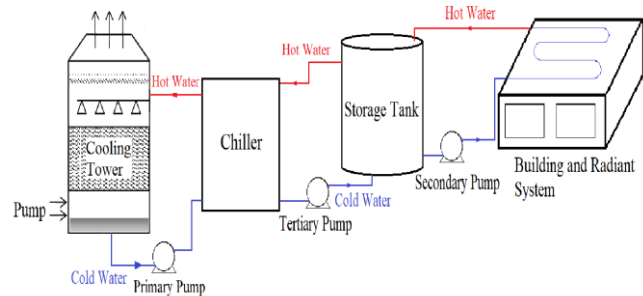
شکل 7 مدل سه نقطه‌ای مخزن ذخیره طبقه‌بندی شده [22]

تابع کنترلی F_i^b نشان دهنده‌ی این است که کدام گره آب برگشتی از ساختمان را دریافت می‌کند:

$$F_i^b = \begin{cases} 1 & \text{if } i = 1 \text{ and } T_{b,exit} > T_{s,1} \\ 1 & \text{if } T_{s,i-1} \geq T_{b,exit} > T_{s,i} \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or if } i = N + 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$



شکل 4 سیستم سرمایشی تابشی همراه چیلر (سیستم مرسوم)



شکل 5 سیستم سرمایش تابشی همراه با چیلر و مخزن ذخیره انرژی

5- مدل سازی

5-1- مخزن ذخیره حرارتی

در مدل مخازن ذخیره حرارتی طبقه‌بندی شده، سطوح مختلف دما وجود دارد، به‌گونه‌ای که دمای بخش بالایی مخزن بیشتر از دمای بخش پایینی آن است. مدل‌های بسیاری برای مخازن طبقه‌بندی شده ارائه شده است که در این تحقیق به مدل چند نقطه‌ای پرداخته شده است. در این مدل یک مخزن به n گره تقسیم‌بندی می‌شود و معادلات انرژی برای هر گره نوشته می‌شود. نتیجه‌ی حاصل، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی است که برای هر گره تابعی از زمان قابل حل است.

برای فرموله کردن مخزن ذخیره چند نقطه‌ای ابتدا لازم است فرضیاتی در مورد نحوه توزیع آب ورودی به هر کدام از گره‌های مخزن بیان شود. به عنوان مثال در شکل 6 مخزن پنج نقطه‌ای نشان داده شده است که آب با دمای 52 درجه سلیسیوس وارد مخزن می‌شود. دمای آب ورودی بین دمای گره‌ی 2 و 3 مخزن که به ترتیب 55 و 50 درجه سلیسیوس است، قرار دارد. می‌توان فرض کرد تمام انرژی آب ورودی که حاصل از انتقال جرم است، مستقیماً وارد گره 3 می‌شود که چگالی آن گره با چگالی آب ورودی تقریباً برابر است [22].

2-5- مدل سازی ساختمان در انرژی پلاس

از نرم افزار انرژی پلاس برای محاسبه و تحلیل انرژی در ساختمان‌ها با امکان شبیه‌سازی مصالح، بارهای داخلی و خارجی و تجهیزات تهویه مطبوع فراهم شده است. در سال 2016 مجموعه‌ای از مطالعات تجربی جهت اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزار انرژی پلاس در چند آزمایشگاه ملی با نظارت وزارت انرژی ایالات متحده انجام شد. عواملی نظیر دمای داخلی، شار حرارتی، نرخ جریان هوا و جریان آب و دما در سیستم‌های تهویه مطبوع به همراه داده‌های آب و هوایی اندازه گیری شد. مقایسه نشان داد میانگین خطای مطلق نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در حدود 2/7٪ است [23]. علاوه بر این صحت نتایج شبیه‌سازی با روش موازنه انرژی در برخی از تحقیقات پیشین مورد ارزیابی قرار گرفته است [13 و 15].

جهت شبیه‌سازی در ابتدا مدل ساختمانی (CASE600) با مصالح ذکر شده در جدول 2 با ترتیب قرارگیری لایه‌ها در جدول 3 در نرم‌افزار انرژی پلاس ایجاد شده است. سپس سیستم‌های سرمایشی نشان داده شده در شکل‌های 3، 4 و 5 که به ترتیب شامل سیستم سرمایش تابشی پیشنهادی، سیستم سرمایش تابشی همراه با چیلر و سیستم سرمایش تابشی همراه با چیلر و مخزن ذخیره انرژی می‌باشند با تجهیزات مربوطه در نرم افزار تعریف و مدل‌سازی شده است. برای بررسی عملکرد مدل مخزن مورد نظر در سیستم سرمایشی تابشی نیازمند اتصال مدل مخزن به ساختمان است. جهت اتصال مدل مخزن که در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده به نرم‌افزار EnergyPlus نیاز به استفاده از نرم‌افزار BCVTB است که متغیرهای مربوطه مانند دما و دبی را در هر گام زمانی بین متلب و انرژی پلاس جابه‌جا کند [24]. در این حالت داده‌های عملکردی نظیر دماهای ورودی و دبی آب و همچنین شرایط محیطی توسط نرم افزار BCVTB از نرم‌افزار انرژی پلاس دریافت می‌شود و به کد متلب ارسال می‌گردد و سپس بعد از شبیه‌سازی عملکرد مخزن، داده‌های خروجی جهت اعمال در برنامه انرژی پلاس ارسال می‌گردد و متغیرهای مورد نیاز جهت بررسی عملکرد در هر گام زمانی محاسبه و استخراج می‌شود. در شکل 8 مراحل شبیه‌سازی به ترتیب آورده شده است. لازم به ذکر است گام زمانی انتخاب شده در این مدل‌سازی 10 دقیقه می‌باشد و عملکرد سیستم‌های سرمایشی ذکر شده در بخش 4 برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز که معرف سه نوع شرایط محیطی مختلف می‌باشند در فصل گرما ارزیابی شده است.

بطور مشابه، جریان برگشتی از برج خنک‌کن با تابع کنترلی F_i^T کنترل می‌شود:

$$F_i^T = \begin{cases} 1 & \text{if } i = N \text{ and } T_{T,exit} > T_{s,N} \\ 1 & \text{if } T_{s,i-1} \geq T_{T,exit} > T_{s,i} \\ 0 & \text{if } i = 0 \text{ or if } i = N + 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

دبی جریان بین گره‌های مخزن می‌تواند به سمت بالا یا پایین باشد که بستگی به مقدار دبی ورودی از ساختمان و برج خنک‌کن دارد. برای تعیین جهت جریان و مقدار دبی از توابع کنترلی معادله 3 و معادله 4 و معادله 5 استفاده شده است.

$$\dot{m}_{m,N+1} = 0 \quad (3)$$

$$\dot{m}_{m,i} = \dot{m}_b \sum_{j=1}^{i-1} F_j^b - \dot{m}_T \sum_{j=i+1}^N F_j^T \quad (4)$$

$$\dot{m}_{m,N+1} = 0 \quad (5)$$

با توجه به توابع کنترلی، بالانس انرژی برای گره i بصورت معادله 6 بدست آمده است.

$$m_i \frac{dT_{s,i}}{dt} = \left(\frac{A}{C_p}\right)_i q''_{solar} + \left(\frac{UA}{C_p}\right)_i (T_a - T_{s,i}) + F_i^b \dot{m}_b (T_{b,exit} - T_{s,i}) + F_i^T \dot{m}_T (T_{T,exit} - T_{s,i}) + \begin{cases} \dot{m}_{m,i} (T_{s,i-1} - T_{s,i}) & \text{if } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i+1} (T_{s,i} - T_{s,i+1}) & \text{if } \dot{m}_{m,i+1} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

که $(UA)_i (T_a - T_{s,i})$ اتلافات ناشی از انتقال حرارت جابجایی و $A_i q''_{solar}$ اتلافات ناشی از تابش خورشیدی است و q''_{solar} با استفاده از نرم‌افزار PVSyst و برازش منحنی، معادلات آن استخراج شده است که در معادله 7، معادله 8 و معادله 9 نشان داده شده است. همچنین در معادله‌های ذکر شده متغیر t ، معرف زمان بر حسب ساعت در یک شبانه روز است.

$$q''_{solar}(t) = 0 \quad \text{for } 0 \leq t \leq 3.9355 \quad (7)$$

$$q''_{solar}(t) = 0.1765 t^4 - 7.9524 t^3 + 105.25 t^2 - 359.41 t + 226.25 \quad \text{for } 3.9355 < t < 18.0971 \quad (8)$$

$$q''_{solar}(t) = 0 \quad \text{for } 24 \geq t \geq 18.0971 \quad (9)$$

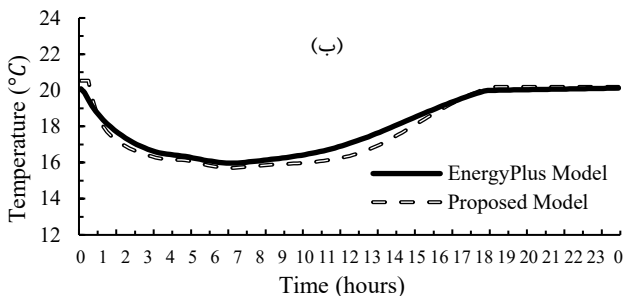
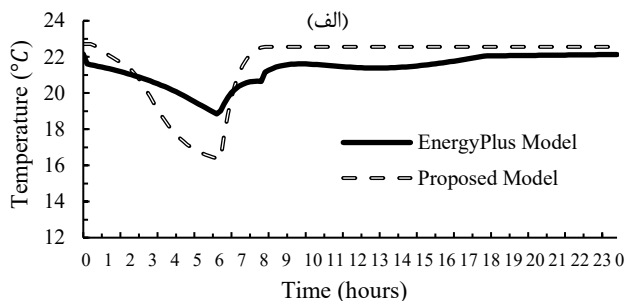
در این تحقیق مدل کد شده برای اتصال به انرژی پلاس مدل سه نقطه‌ای مخزن است که معادلات آن ذکر شده است. دلیل استفاده از این مدل نسبت به مدل پنج نقطه‌ای یا بیشتر، می‌توان به افزایش سرعت مدل‌سازی، دقت قابل قبول آن و سادگی مدل اشاره کرد.

سیستم تابشی در 4 حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که در حالت اول چیلر الکتریکی بدون مخزن ذخیره تامین کننده آب سرد مصرفی سیستم سرمایش تابشی است، در حالت دوم چیلر الکتریکی با مخزن ذخیره به سیستم سرمایش تابشی متصل است. در حالت سوم چیلر حذف شده است و مخزن ذخیره حرارتی محسوس که بطور مستقیم به برج خنک‌کن جهت تامین آب سرد سیستم سرمایش تابشی متصل است و در حالت چهارم سیستم سرمایش همانند حالت سوم است با این تفاوت که در حالت سوم برج خنک‌کن در ساعات کم باری، مخزن ذخیره را شارژ می‌کند درحالیکه در حالت چهارم کارکرد برج خنک‌کن جهت شارژ مخزن در ساعات‌های میان باری و پر باری انجام می‌شود.

با توجه به زمان بندی شبکه برق کشور برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور در هر شبانه روز، از ساعت 3 تا 9 صبح ساعات‌های کم باری، از ساعت 14 تا 19 ساعات‌های پر باری و بقیه ساعات‌های شبانه روز، ساعات‌های میان باری در نظر گرفته شده است [27].

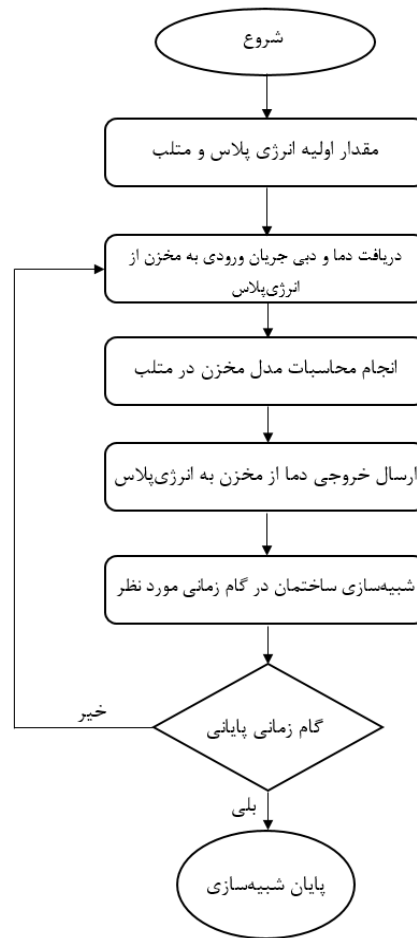
1-6- اعتبارسنجی مدل مخزن ذخیره انرژی محسوس

در شکل 9 دمای خروجی مخزن مدل پیشنهادی با مدل ساده انرژی پلاس در روز طرح سی‌ویکم تیر (21 جولای) مقایسه شده است. شکل 9 الف و ب به ترتیب دمای خروجی مخزن به برج خنک‌کن و دمای خروجی مخزن به ساختمان نشان داده شده است. همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است، روند تغییرات در هر دو مدل تقریباً یکسان می‌باشد و دلیل اختلاف اندک آن این است که در مدل پیشنهادی تلفات ناشی از خورشید و جابجایی در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان گفت که مدل پیشنهادی از دقت خوبی برخوردار است.



شکل 9 اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مخزن با مدل ساده انرژی پلاس در روز طراحی (الف) دمای خروجی مخزن به برج خنک‌کن (ب) دمای خروجی مخزن به ساختمان

2-6- ارزیابی مصرف انرژی



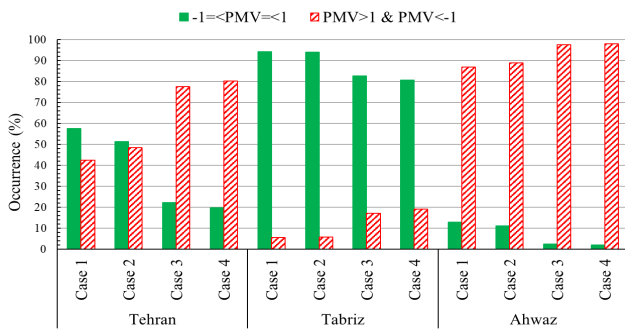
شکل 8 فلوچارت از نحوه اتصال مدل مخزن و ساختمان

3-5- فرضیات شبیه‌سازی

جهت ارزیابی عملکرد سیستم‌های سرمایشی، ظرفیت منابع تامین کننده سرمایش نظیر چیلر، برج خنک‌کن و دبی آب در پمپ‌ها با توجه به بار حرارتی روز طراحی شهرهای منتخب توسط نرم افزار محاسبه و انتخاب شده است. در حالت‌هایی که از چیلر استفاده شده است دمای آب خروجی از چیلر 8°C لحاظ شده است و در سیستم‌های سرمایشی که برج خنک‌کن به عنوان تنها تامین کننده سرمایش استفاده شده است دمای آب خروجی از برج خنک‌کن تابع شرایط محیطی است که در هر گام زمانی محاسبه و اعمال شده است [25]. ساختمان مورد نظر به عنوان یک ساختمان اداری لحاظ شده است که زمان حضور افراد از ساعت 7 تا 17 روزهای اداری است. برای فضای اداری مذکور میزان پوشش افراد 1 clo، نرخ متابولیک 1/2 met و تعداد افراد 3 نفر در نظر گرفته شده است. clo واحدی است که درجه عایق ارائه شده توسط یک لباس را توصیف می‌کند. یک clo مقدار لباس مورد نیاز یک انسان در حال استراحت برای حفظ آسایش حرارتی در دمای اتاق 21 درجه سانتی‌گراد یا 71 درجه فارنهایت را نشان می‌دهد. همچنین نرخ متابولیک افراد با واحد met سنجیده می‌شود که هر یک met معادل 58 وات بر متر مربع است [26]. با توجه به تحقیقات پیشین بار ناشی از تجهیزات الکتریکی و سیستم روشنایی به ترتیب 17 و 7 وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [13].

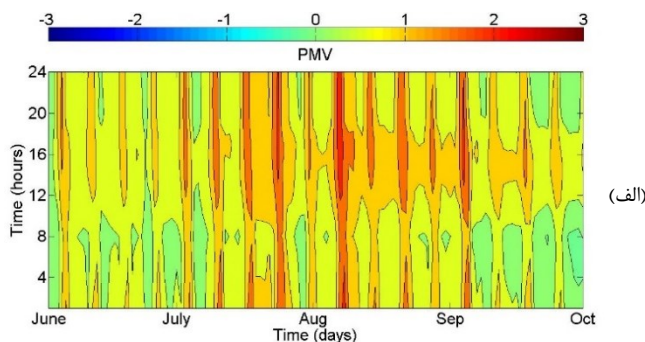
6- نتایج

11 خرداد (1st June) تا 9 مهر (1st October)، مورد بررسی قرار گرفته است. در این نمودار پارامتر آسایش حرارتی در ساعات حضور افراد گزارش شده است. با توجه به نمودار می‌توان دریافت که سیستم سرمایش تابشی در شهر تبریز برای حالت اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب می‌تواند آسایش 83، 94، 94/4 و 80/8 درصد افراد را تامین کند که بهترین عملکرد را بین سه شهر مورد بررسی دارد. دلیل عملکرد بهتر سیستم سرمایش تابشی در شهر تبریز در مقایسه با شهرهای اهواز و تهران این است که میزان رطوبت در شهر تبریز به نسبت دو شهر دیگر کمتر است و عملکرد سیستم تابشی رابطه‌ی مستقیمی با رطوبت محیط دارد.

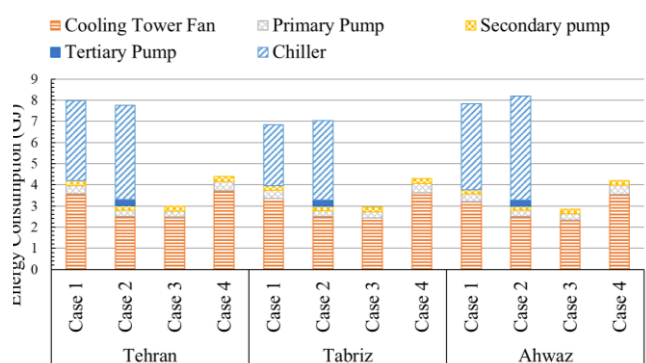


شکل 11 آنالیز آسایش حرارتی بر اساس مدل فنگر در سه حالت ذکر شده برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز

برای بررسی دقیق‌تر PMV نمودارهای فرشی برای سه شهر تهران، تبریز و اهواز در شکل 12، شکل 13، شکل 14 قرار گرفته شود که در تمام گام‌های زمانی شبیه‌سازی و سه حالت مورد بررسی، مقدار آسایش حرارتی نمایش داده شده است. با توجه به شکل 12، مقادیر آسایش حرارتی در شهر تهران برای حالت اول در ماه‌های خرداد و تیر و همچنین در شهریور در بازه‌ی قابل قبول قرار دارد، در حالی که برای حالت سوم و چهارم مقادیر PMV در اکثر ماه‌های مورد بررسی بالاتر از مقدار قابل قبول یک می‌باشد. همانطور که در شکل 13 نشان داده شده است، در شهر تبریز برای حالت اول آسایش حرارتی تقریباً در تمام ساعت‌ها تامین شده است این در حالی است که در حالت سوم و چهارم سیستم سرمایشی قابلیت تامین آسایش حرارتی افراد را در اواسط ماه‌های جولای و آگوست را ندارد. در شکل 14 مقادیر PMV برای شهر اهواز نمایش داده شده است، با توجه به مقدار قابل قبول PMV بین -1 و 1، سیستم سرمایش تابشی در شهر اهواز نمی‌تواند آسایش حرارتی افراد را تامین کند.



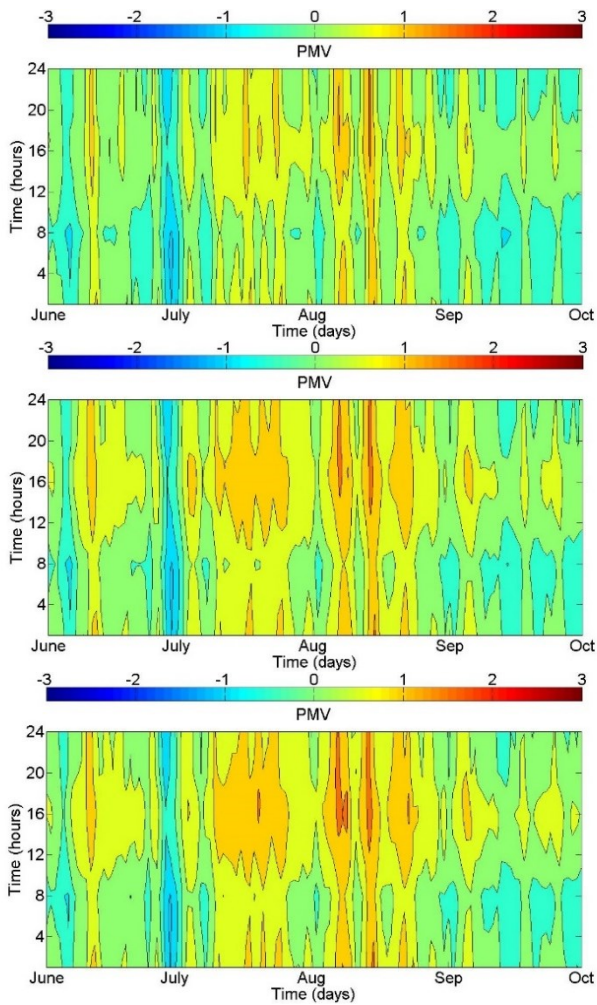
همانطور که در شکل 3، شکل 4 و شکل 5 نشان داده شده است، تجهیزات مصرف‌کننده انرژی در حالت اول شامل چیلر، پمپ اولیه، پمپ ثانویه و فن برج خنک‌کن، در حالت دوم چیلر، پمپ اولیه، پمپ ثانویه، پمپ ثالث و فن برج خنک‌کن و در حالت سوم پمپ اولیه، پمپ ثانویه و فن برج خنک‌کن است. در شکل 10 میزان مصرف هر تجهیز نشان داده شده است که در حالت اول و دوم در مقایسه با حالت سوم و چهارم بدلیل وجود چیلر مصرف انرژی به مقدار قابل توجهی بیشتر است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، قسمت عمده‌ای از مصرف انرژی کل در سیستم مرسوم (حالت 1) به چیلر اختصاص یافته است به نحویکه این میزان مصرف انرژی در بازه مورد بررسی در شهرهای اهواز، تهران و تبریز به ترتیب در حدود 4، 3/8 و 2/9 گیگاژول می‌باشد. با توجه به شکل 10، مصرف انرژی سیستم مرسوم در حالت اول و دوم برای شهر تهران به ترتیب 8 و 7/76 گیگاژول، برای شهر تبریز 6/8 و 7 گیگاژول، برای شهر اهواز 7/8 و 8/2 گیگاژول است که در مقایسه با سیستم پیشنهادی مصرف انرژی بیشتری دارد. همانطور که در شکل 10 نشان داده شده است، میزان مصرف انرژی سیستم پیشنهادی در حالت سوم و حالت چهارم برای شهر تهران به ترتیب 3 و 4/4 گیگاژول، برای شهر تبریز 2/95 و 4/3 گیگاژول و برای شهر اهواز 2/86 و 4/2 گیگاژول می‌باشد که بدلیل زمان کارکرد برج خنک‌کن در حالت سوم و چهارم، مصرف انرژی در حالت سوم کمتر می‌باشد. در نتیجه، سیستم پیشنهادی در حالت سوم (کارکرد برج خنک‌کن در ساعات کم باری) در سه شهر مورد بررسی بهترین عملکرد را از نظر مصرف انرژی دارد.



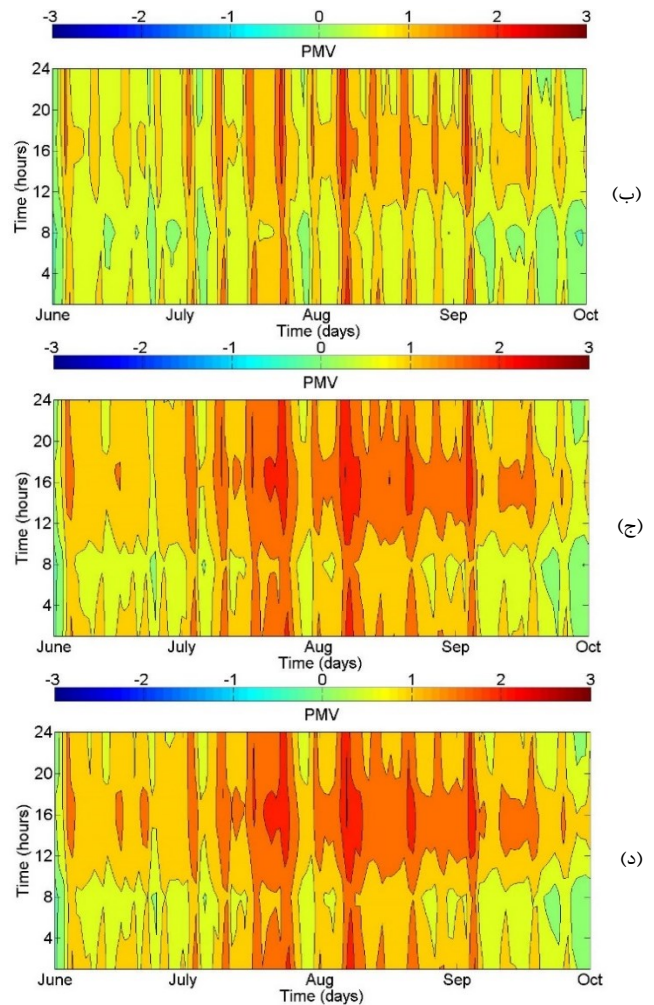
شکل 10 مصرف انرژی اجزاء سیستم سرمایش تابشی برای سه حالت ذکر شده در شهرهای تهران، تبریز و اهواز

3-6- ارزیابی آسایش حرارتی

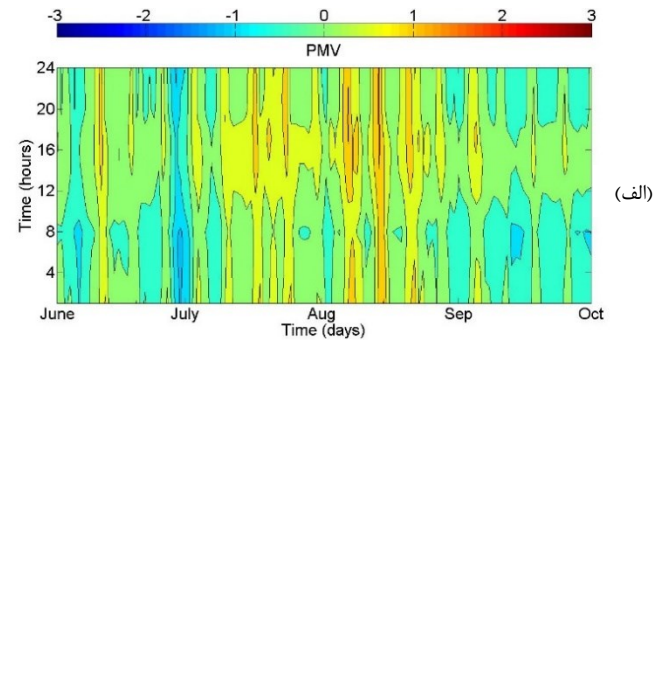
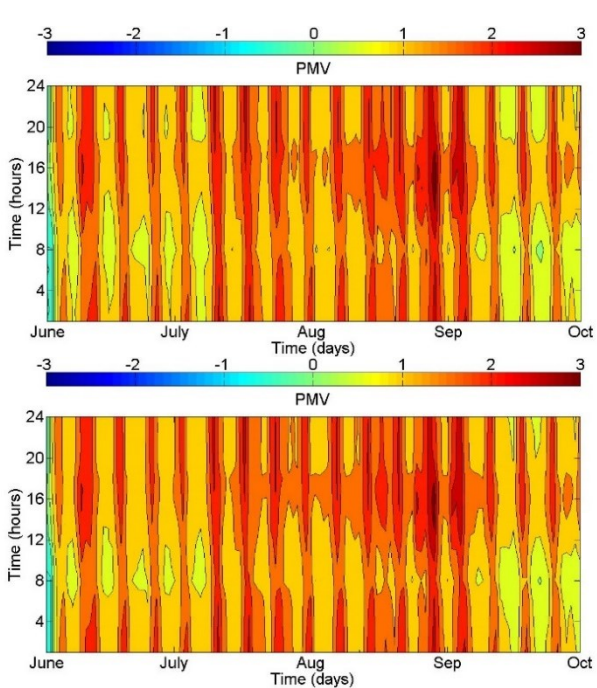
برای سنجش میزان آسایش حرارتی افراد معیار PMV مورد بررسی قرار گرفته است. این معیار بر اساس مدل ریاضی آسایش حرارتی ارائه شده توسط فنگر که به عنوان یکی از مدل‌های آسایش حرارتی رایج شناخته می‌شود به بررسی احساس حرارتی افراد می‌پردازد [28]. این معیار با اختصاص یک عدد به احساس حرارتی افراد در محدوده -3 تا 3 تعریف می‌شود. عدد 3 بیانگر شرایط خیلی گرم، 2 گرم، 1 کمی گرم، 0 خنثی، -1 کمی سرد، -2 سرد و -3 خیلی سرد است. اگرچه استاندارد حرارتی ایزو 7730، محدوده بین 0/5 و -0/5 را به عنوان محدوده ایده‌آل برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند [29]، محدوده بین 1 و -1 که در آن 80٪ افراد حاضر احساس رضایت دارند، به عنوان محدوده قابل قبول آسایش حرارتی توسط برخی از پژوهشگران ارائه شده است [30]. در شکل 11، نمودار ارزیابی آسایش حرارتی سیستم سرمایش تابشی در سه حالت برای شهرهای مختلف با توجه به معیار PMV در فصل گرما از



شکل 13 آنالیز آسایش حرارتی برای شهر تبریز (الف) حالت اول (ب) حالت دوم (ج) حالت سوم (د) حالت چهارم



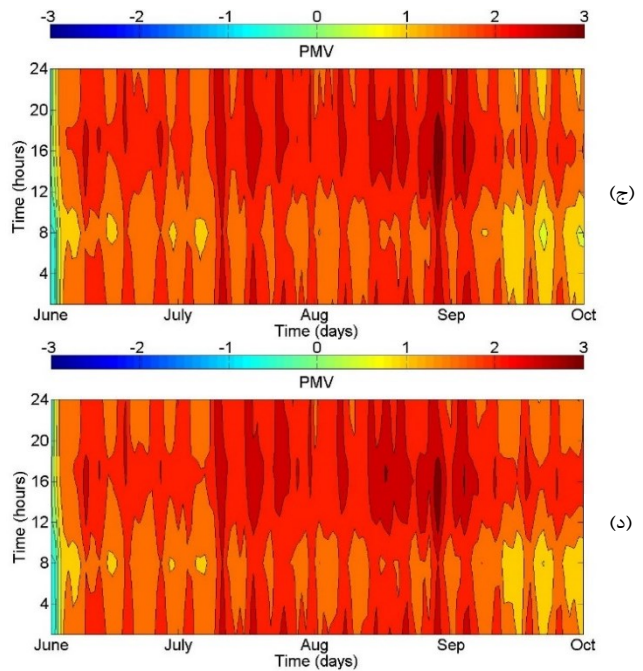
شکل 12 آنالیز آسایش حرارتی برای شهر تهران (الف) حالت اول (ب) حالت دوم (ج) حالت سوم (د) حالت چهارم



سیستم‌های سرمایش تابشی در چهار حالت مختلف و در سه شهر تهران، تبریز و اهواز که دارای شرایط اقلیمی متفاوتی هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. از مدل سه نقطه‌ای جهت مدل‌سازی مخزن و از نرم‌افزار انرژی پلاس جهت مدل‌سازی سیستم سرمایشی و ساختمان استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مخزن ذخیره حرارتی متصل به برج خنک‌کن در ساعات کم‌باری (حالت سوم)، بهینه‌ترین گزینه از نظر مصرف انرژی و هزینه است. در این حالت، مصرف انرژی برای تهران، تبریز و اهواز به ترتیب 3، 2/9 و 2/8 گیگاژول بوده و کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی مشاهده شده است. همچنین، تحلیل آسایش حرارتی نشان داده است که این سیستم تابشی در تبریز عملکرد بهتری نسبت به سایر شهرها داشته و توانسته است آسایش حرارتی 94/4، 83 و 80/8 درصد افراد را، به ترتیب برای حالت‌های اول، دوم، سوم و چهارم فراهم کند. در مقابل، سیستم پیشنهادی برای حالت‌های مختلف در اهواز قادر به تامین آسایش حرارتی افراد نبوده است. از نتایج تحلیل اقتصادی نیز می‌توان دریافت که سیستم سرمایش تابشی در حالت سوم در سه شهر مورد بررسی، می‌تواند هزینه مصرف انرژی را تا حدود 300 تا 600 هزار ریال در ماه کاهش دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که انتخاب صحیح سیستم سرمایشی متناسب با شرایط آب و هوایی می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی کمک شایانی کند.

8- مراجع

- [1] U. Eicker, *Energy Efficient Buildings with Solar and Geothermal Resources*, 1st ed. Stuttgart, University of Applied Sciences, Germany: Wiley, 2014.
- [2] Y. Hwang, R. Radermacher, A. A. Alili, and I. Kubo, Review of Solar Cooling Technologies, *HVAC&R Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 507-528, 2008.
- [3] N. Fumo, P. Mago, and R. Luck, Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 12, pp. 2331-2337, 2010.
- [4] T. Hong, M. A. Piette, Y. Chen, S. H. Lee, S. C. Taylor-Lange, R. Zhang, K. Sun, and P. Price, Commercial building energy saver: An energy retrofit analysis toolkit, *Applied Energy*, Vol. 159, pp. 298-309, 2015.
- [5] Y. Yau and B. Rismanchi, A review on cool thermal storage technologies and operating strategies, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 787-797, 2012.
- [6] I. Dincer, On thermal energy storage systems and applications in buildings, *Energy and buildings*, Vol. 34, No. 4, pp. 377-388, 2002.



شکل 14 آنالیز آسایش حرارتی برای شهر اهواز (الف) حالت اول (ب) حالت دوم (ج) حالت سوم (د) حالت چهارم

4-6- تحلیل اقتصادی

برای محاسبه هزینه سیستم مورد نظر ابتدا مقادیر مصرف انرژی استخراج شده و سپس با توجه به جدول 4 که هزینه مصرف برق به ازای هر کیلووات ساعت است، محاسبات اقتصادی توسط نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شده است.

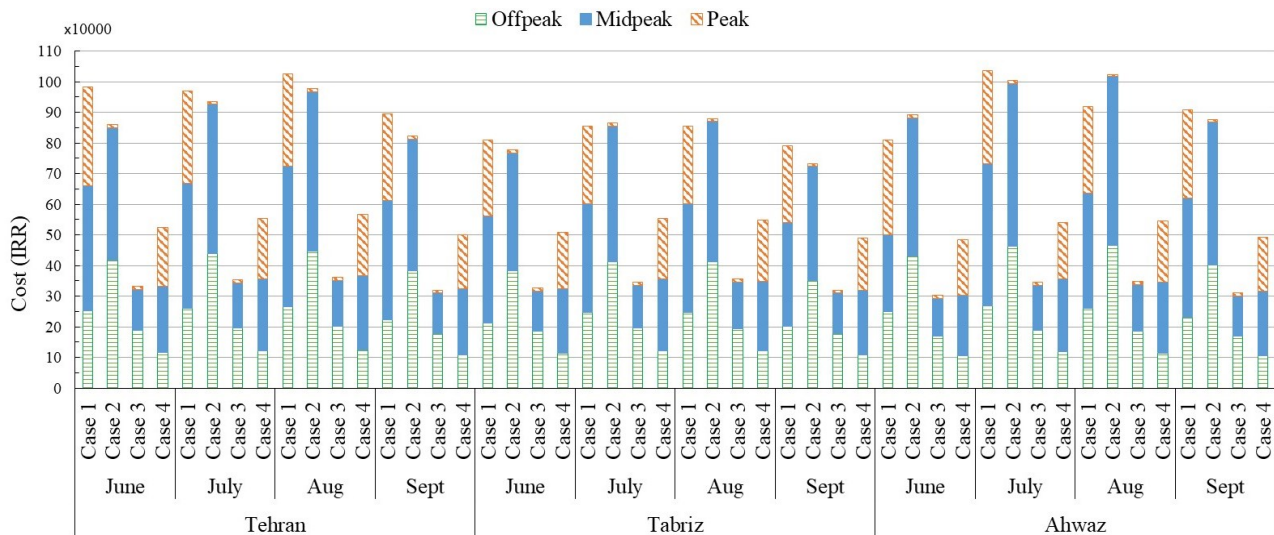
جدول 4 گزارش قیمت انرژی در سال 1402 (ریال بر کیلووات ساعت) [27]

ماه	ساعت‌های کم باری	ساعت‌های میان باری	ساعت‌های پر باری
خرداد	1544/52	1736	1896/60
تیر	1636/33	1903/86	2003/94
مرداد	1518/68	1799/13	1862/22
شهریور	1467/78	1739/23	1792/02

در شکل 15 برآورد هزینه سیستم سرمایش تابشی در چهار حالت بررسی شده در سه شهر تهران، تبریز و اهواز نشان داده شده است. حالت دوم در حدود 5 درصد هزینه مصرف انرژی و حالت سوم در حدود 70 درصد هزینه مصرف انرژی را در مقایسه با سیستم سرمایش تابشی مرسوم (حالت اول) کاهش داده است در حالی که حالت چهارم در حدود 50 درصد هزینه مصرف انرژی را کاهش داده است. در مقایسه حالت سوم و چهارم می‌توان یافت که دلیل کارکرد برج خنک‌کن جهت شارژ مخزن در ساعات کم باری در حالت سوم هزینه مصرف انرژی در حدود 30 درصد کمتر از حالت چهارم است که مخزن اغلب در ساعات میان باری و پر باری کار می‌کند.

7- نتیجه‌گیری

براساس تحقیقات پیشین سیستم‌های سرمایش تابشی با توجه به توزیع یکنواخت قادر به تامین شرایط آسایش حرارتی هستند. در این مطالعه، عملکرد



شکل 15 هزینه پرداختی سیستم تابشی به صورت کلی

- [18] A. Omidvar, M. Marefat, and A. Zolfaghari, Feasibility Study of Using Radiant Ceiling Cooling Systems Considering Climate Diversity in Iran, *Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 64, pp. 47-55, 2010. (in Persian)
- [19] A. Zolfaghari, M. Saadatinasab, and E. Noroozi Jajarm, Investigation of the Effect of Green Double Skin Facades on Energy Consumption of High-rise Buildings in Tehran's Climatic Conditions, *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 17, No. 56, pp. 51-61, 2019. (in Persian)
- [20] J. D. Feng, S. Schiavon, and F. Bauman, Cooling load differences between radiant and air systems, *Energy and Buildings*, Vol. 65, pp. 310-321, 2013.
- [21] I. Doebber, Radiant slab cooling for retail, *ASHRAE Journal*, Vol. 52, No. 12, pp. 28, 2010.
- [22] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Fourth Edition, pp. 373-408, John Wiley & Sons, 2013.
- [23] 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*, pp. 1-9, 2020.
- [24] M. Wetter and T. Noudui, *Building Controls Virtual Test Bed User Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012.
- [25] M. Nasrabadi and D. P. Finn, Mathematical modeling of a low temperature low approach direct cooling tower for the provision of high temperature chilled water for conditioning of building spaces, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 64, No. 1, pp. 273-282, 2014.
- [26] *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2013.
- [27] *Electricity Market Summer Report 2023*, Accessed 20 December 2023; <https://www.irema.ir/fa>. (in Persian)
- [28] P. Fanger, Thermal environment Human requirements, *Environmentalist*, Vol. 6, pp. 275-278, 1986.
- [29] M. Vaughn, 2013-2014: ASHRAE research report, *ASHRAE Journal*, Vol. 56, No. 10, pp. 89-99, 2014.
- [30] 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, pp. 799-806, 2010.
- [7] K. Fong, T. T. Chow, C. K. Lee, Z. Lin, and L. Chan, Solar hybrid cooling system for high-tech offices in subtropical climate—Radiant cooling by absorption refrigeration and desiccant dehumidification, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 8-9, pp. 2883-2894, 2011.
- [8] Y. Khan, V. R. Khare, J. Mathur, and M. Bhandari, Performance evaluation of radiant cooling system integrated with air system under different operational strategies, *Energy and Buildings*, Vol. 97, pp. 118-128, 2015.
- [9] X. Zhou, Y. Liu, J. Zhang, L. Ye, and M. Luo, Radiant asymmetric thermal comfort evaluation for floor cooling system—A field study in office building, *Energy and Buildings*, Vol. 260, pp. 111917, 2022.
- [10] F. Reda, M. Viot, K. Sipilä, M. Helm, Energy assessment of solar cooling thermally driven system configurations for an office building in a Nordic country, *Applied Energy*, Vol. 166, pp. 27-43, 2016.
- [11] M. Nasrabadi, A. Zolfaghari, and F. Rabbani, Modeling and Thermal Analysis of Energy Storage Tank for Performance Evaluation in Solar Collector Cycle, *Sixth Annual Clean Energy Conference*, Shiraz University, Shiraz, Iran, 2017. (in Persian)
- [12] M. Nasrabadi and F. Rabbani, Modeling of Energy Storage Tank for Application in HVAC Systems, *Twenty-Eighth Annual International Mechanical Engineering Conference*, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2020. (in Persian)
- [13] M. Nasrabadi and D. P. 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. 16, No. 6, pp. 754-779, 2022.
- [14] M. Nasrabadi and D. P. Finn, Performance Assessment of an Integrated Low-Approach Low-Temperature Open Cooling Tower with Radiant Cooling and Displacement Ventilation for Space Conditioning in Temperate Climates, *Energies*, Vol. 17, No. 15, pp. 1-30, 2024.
- [15] M. Nasrabadi, Performance analysis of a radiant cooling system connected to a cooling tower in comparison to a fan-coil system in different climatic conditions of Iran, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 2, pp. 64-76, 2023.
- [16] F. Rabbani, M. Nasrabadi, and A. Zolfaghari, 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*, Vol. 21, No. 73, pp. 187-200, 2023. (in Persian)
- [17] M. Nasrabadi, M. Daagho, and A. Zolfaghari, Investigation of the Performance of Combined Solar Floor Heating System for Small Residential Buildings in the Climate of Iran, *Twenty-Seventh Annual International Mechanical Engineering Conference*, University of Tehran, Tehran, Iran, 2019. (in Persian)