

ارزیابی فنی و اقتصادی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی سرما برای ساختمان اداری در اقلیم‌های مختلف ایران

حسن عسگری^۱، رامین مهدی‌پور^{۲*}، داود شفیعی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تفرش، شهر تفرش، ایران

hasanasgari2441370@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه تفرش، شهر تفرش، ایران

mehdipour@tafreshu.ac.ir

^۳ رئیس امور پژوهش شرکت گاز استان مرکزی، استان مرکزی، ایران

davoodshafiei41@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، عملکرد سیستم ذخیره‌ساز سرما با مخزن یخ برای یک ساختمان اداری بررسی شده است. استراتژی مورد بررسی برای این سیستم، پر کردن مخزن ذخیره یخ به مدت ۸ یا ۱۶ ساعت در زمان غیرپیک مصرف برق بوده و در نهایت تخلیه مخزن ذخیره یخ برای تأمین بار سرمایشی در ساعت کاری (یا پیک بار برودتی) در ساختمان است. ساختمان مورد بررسی ساختمان چهارطبقه همراه با زیرزمین و زیربنایی بالغ بر ۳۱۰۶ مترمربع است. در این مطالعه، عملکرد سیستم ذخیره‌ساز سرما در ۶ شهر مختلف کشور ایران بررسی شده است. اثر این سیستم روی مصرف انرژی برای ذخیره و تخلیه مخزن ذخیره سرما بررسی شده است و در نهایت مقایسه‌ای روی مصرف برق چیلر در حالت بدون و با سیستم ذخیره‌سازی سرما شبیه‌سازی شده و اثر این موضوع بر ضریب عملکرد سیستم مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این سیستم در شهر بندرعباس در زمان پیک شبکه سراسری برق کشور، عملکرد بهتری دارد. نتایج نشان داد که در مناطق گرمسیر، این سیستم دارای تأثیر بیشتری روی پیک سابی شبکه برق دارد. با به‌کارگیری تکنولوژی ذخیره‌سازی سرما بیش از ۲۶٪ از مصرف برق در زمان اوج مصرف بار برودتی کاهش می‌یابد. در انتهای این تحقیق، بررسی اقتصادی ذخیره‌ساز سرما انجام شده و مشخصات سیستم مناسب با توجه به تعرفه برق ایران تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی سرما در یخ، انرژی پلاس، مصرف انرژی، مخزن ذخیره انرژی، اقلیم‌های مختلف ایران.

۱. مقدمه

افزایش مستمر تقاضای انرژی و قیمت انرژی فسیلی باعث شده است که در بسیاری از کشورهای جهان، استفاده کارآمد از منابع مختلف انرژی، مدیریت میزان تقاضا و تولید انرژی در اولویت سیاست‌گذاری‌ها قرار داده شود. کشور ما نیز از این قاعده مستثنا نبوده و با سیاست‌گذاری‌های دولت از جمله هدفمندسازی یارانه‌ها و یا عرضه انرژی الکتریکی چندتعارفه‌ای به واحدهای صنعتی و... اهمیت مباحث مدیریت تولید و تقاضای انرژی در کشور افزایش یافته است.

در بازار نابسامان انرژی امروز، میزان مصرف انرژی یک مسئله بسیار مهم است؛ بنابراین به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته در نحوه مصرف انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نواحی گرم و مرطوب ۶۰٪ از انرژی الکتریکی تولیدشده صرف تهویه مطبوع می‌شود. در نتیجه، افزایش کارایی سیستم‌های تهویه مطبوع علاوه بر کاهش مصرف می‌تواند هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای ساخت نیروگاه‌های جدید را نیز کاهش دهد. روش‌های ذخیره‌سازی انرژی، یک روش کارآمد در این حوزه است. روش‌های متعددی برای ذخیره‌سازی انرژی در ساختمان‌ها به کار می‌رود که می‌توان آن‌ها را به دو دسته فعال و خودبه‌خودی تقسیم کرد. در تکنیک‌های خودبه‌خودی، هرگونه بار گرمایشی در ساختمان با استفاده از عایق، سایبان، رنگ و... کاهش می‌یابد.

مدیریت مصرف انرژی با به‌کارگیری تعرفه متغیر، بهینه‌سازی روش‌های سرمایشی موجود و سیاست ذخیره‌سازی انرژی را می‌توان به‌عنوان مثال‌هایی از روش فعال نام برد؛ به‌خصوص ایده ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی باعث پیک‌سایی مصرف انرژی الکتریکی ساختمان‌ها در اواسط روز می‌شود.

ذخیره‌سازی بدین معناست که زمان استفاده با زمان تولید متفاوت بوده و برای بهره‌برداری نیاز به یک سیستم میانی و یا مخزن برای جابه‌جایی انرژی است. از آنجا که انرژی الکتریکی در حال حاضر به‌صورت مستقیم قابل ذخیره‌سازی نیست و انرژی الکتریکی برای بسیاری از دستگاه‌های صنعتی و لوازم خانگی به‌عنوان منبع انرژی اولیه محسوب می‌شود. لذا ذخیره‌سازی آن به‌صورت انرژی حرارتی، مکانیکی و شیمیایی انجام می‌گیرد. از چهار نوع انرژی، انرژی حرارتی به‌صورت گسترده و با حجم زیاد قابل ذخیره‌سازی است و سایر حامل‌های انرژی به‌صورت محدود و در مواردی با هزینه‌های نسبتاً زیادی قابل ذخیره‌سازی هستند.

یکی از راهکارهای یکنواخت ساختن تقاضای انرژی، ذخیره‌سازی انرژی حرارتی است؛ به‌طوری که اعمال این راهکار باعث کاهش مصرف برق در ساعات پیک و افزایش آن در ساعات غیرپیک می‌شود.

بدیهی است که توزیع بار و یکنواخت ساختن منحنی بار الکتریکی، در بالا بردن راندمان کلی نیروگاه‌های موجود و کاهش رشد تولید الکتریسته مؤثر است.

از آنجایی که یکی از عوامل ایجاد پیک مصرف برق در ساعات گرم تجهیزات تهویه مطبوع ساختمان‌ها هستند، با انتقال ساعات بهره‌برداری این تجهیزات به ساعات غیرپیک می‌توان درصد قابل ملاحظه‌ای از بار شبکه در ساعات پیک را کاهش داد. این امر با بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما حاصل می‌شود. سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما با تولید و ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی در ساعات غیرپیک باعث بالا رفتن تقاضا در ساعات غیرپیک و کاهش تقاضا در ساعات پیک می‌شوند.

در داخل کشور نیز مطالعاتی روی این سیستم‌ها انجام گرفته است؛ از جمله کاظمی و لشکری طی تحقیقی نشان دادند که در صورت محاسبه مصرف برق بر اساس تعرفه متغیر بسته به ساعات پیک و غیرپیک با به‌کارگیری سیستم ذخیره‌سازی انرژی سرمایشی، باعث کاهش هزینه مصرف برق می‌شود [۱]. هرچه نسبت اوج بار سرمایشی به کل بار سرمایشی ساختمان در یک دوره بیشتر باشد، به‌کارگیری این سیستم‌ها توجیه اقتصادی بهتری دارد. انصاری طی تحقیقی نشان داده است که به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما برای مشترکان دیماندی صنعتی و مجتمع‌های مسکونی در جابه‌جایی بار شبکه تأثیر مثبتی دارد [۲].

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما از سال‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در کشور آمریکا به‌صورت جدی آغاز شده است. برای استقبال مصرف‌کنندگان، تمهیداتی از جمله تخصیص وام‌های کم‌بهره، ضمانت بازگشت سرمایه و تخفیف به مشترکان به‌ازای هر کیلووات ساعت کاهش بار در ساعات پیک لحاظ شد. مؤثرترین حالت استفاده از این سیستم‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که پیک بار شبکه برق با پیک بار سرمایی ساختمان‌ها هم‌زمان باشد [۳].

سپهر صنایع و علی شیرازی، عملکرد یک سیستم تهویه مطبوع به همراه سیستم ذخیره‌سازی سرما را بررسی کرده‌اند [۴]. در این مقاله هزینه‌های انتشار CO_2 و جنبه محیط‌زیستی در نظر گرفته شده است. نتیجه این تحقیق نشان می‌دهد که میانگین مصرف برق و انتشار CO_2 سیستم ذخیره‌سازی سرما در مقایسه با سیستم‌های متداول به ترتیب ۹٪ و ۹/۸٪ کمتر است. به‌علاوه هزینه‌های اضافی برای سیستم ذخیره‌سازی سرما، از طریق صرفه‌جویی برگشت خواهد داشت؛ که مدت برگشت سرمایه ۳/۴۳ سال است.

پیونگچان و همکاران به کمک نرم‌افزار انرژی پلاس سیستم ذخیره‌سازی سرما را مدل‌سازی و عملکرد این سیستم را بررسی

کرده‌اند [۵]. در این مقاله، عملکرد سیستم ذخیره‌سازی سرما با مخزن یخ برای یک ساختمان اداری کوچک تحت شرایط مختلف بررسی شده است. روان و همکاران در مقاله خود، عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما برای برجی در شانگهای چین را مطالعه کرده‌اند [۶]. آن‌ها در مطالعه خود دو سیستم^۱ BCHP، یکی همراه با سیستم ذخیره‌سازی سرما و دیگری بدون سیستم ذخیره‌سازی سرما را با یک سیستم سرمایشی متداول مقایسه کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم BCHP همراه با سیستم ذخیره‌سازی سرما از دو سیستم دیگر دارای راندمان بالاتر و صرفه اقتصادی بیشتر است.

راهدار و همکاران در مقاله خود روی دو سیستم هیبریدی تهویه مطبوع برای یک ساختمان اداری تحقیق انجام داده‌اند [۷]. سیستم‌هایی که بررسی شده، سیستم ذخیره‌سازی سرما و سیستم ذخیره‌سازی سرما از نوع مواد تغییر فازدهنده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مصرف برق سیستم ذخیره‌سازی سرما و سیستم شامل مواد تغییر فازدهنده از سیستم سرمایشی متداول کمترند؛ همچنین این دو سیستم هیبریدی نسبت به سیستم سرمایشی متداول انتشار CO₂ کمتری دارد. چونگ تای وو و همکاران برای یک بیمارستان در شهر تایپه چین، سیستم ذخیره‌سازی سرما را طراحی کرده‌اند [۸]. این سیستم با استراتژی ذخیره‌سازی سرمای جزئی با تکنولوژی دینامیکی عمل می‌کند. در این بیمارستان دو چیلر اسکرو در نظر گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که این سیستم هوای با کیفیت مناسب‌تری را نسبت به سیستم‌های سرمایشی متداول فراهم می‌کند و همچنین کاهش مصرف برق را به دنبال دارد.

صنایع و همکاران بر روی دو استراتژی جزئی و کامل در سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما مطالعه انجام داده‌اند. در این مطالعه، یک سیستم ذخیره‌سازی سرما از جنبه‌های انرژی، آگزرژی، اقتصادی و محیط زیستی، در حالت جزئی و کامل نسبت به یک سیستم سرمایشی سنتی مقایسه شده است [۹].

راهدار و همکاران روی عملکرد دو مبرد R-717 و R-134a در سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما تحقیق کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مبرد R-717 عملکرد بهتری از R-134a داشته و گاز CO₂ کمتری انتشار می‌دهد [۱۰].

سانگ و همکاران در مقاله خود روی عملکرد استراتژی‌های مختلف ذخیره‌سازی و اثر تعرفه‌های برق بر توجیه اقتصادی پرداخته شده است. در این تحقیق، تعیین مشخصات بهینه ذخیره‌سازی یخ برای چهار ساختمان هتل، رستوران، مرکز خرید و دفتر اداری انجام

شده است [۱۱]. یانگ و همکاران در مقاله خود بر عملکرد حرارتی صفحات تشکیل دهنده یخ پرداخته‌اند؛ که عملکرد این بخش به‌عنوان بخشی از سیستم ذخیره‌سازی سرما پرداخته شده است [۱۲]. اگرچه طراحی کویل‌ها و انتخاب مواد ذخیره‌سازی توجه زیادی را به خود جلب کرده، تحقیقات بسیار کمی در مورد تأثیر دمای ورودی مبرد بر عملکرد کویل‌ها انجام شده است. در مرجع [۱۳] مدل‌سازی یک کویل ذخیره‌سازی یخ با دماهای مبرد مختلف توسط یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار انسیس بررسی شده است. نتایج نشان داد که مبرد با دمای پایین باعث افزایش راندمان تبادل گرمایی شده و ضخامت یخ به‌وجودآمده روی کویل افزایش می‌یابد؛ در نتیجه باعث افزایش راندمان سیستم ذخیره‌سازی سرما می‌شود.

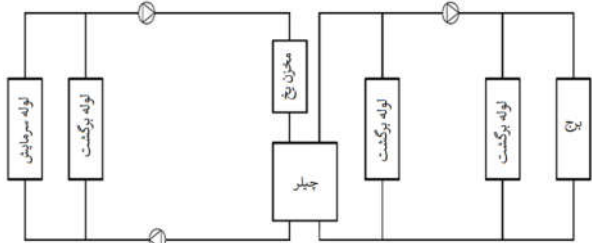
ناسلند سیستم ذخیره‌سازی فصلی را مورد توجه قرار داده است [۱۴]. در این تحقیق، یک سیستم خنک‌کننده منطقه‌ای با استفاده از ۱۲۲۵۰۰ مترمکعب برف ذخیره‌شده در زمستان ارائه شده است. در این سیستم حدود ۴۳/۶ تا ۶۶/۸٪ از کل تقاضای خنک‌سازی یک ساختمان بیمارستان در تابستان به کمک این سیستم تهیه شده است [۱۴].

در مرجع [۱۵]، ویژگی‌های یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی فصلی حرارتی برای خنک‌سازی ساختمان‌های پارلمان آلمان در مدت ۱۰ سال مورد بحث قرار گرفته است. بر اساس تحلیل سوابق داده‌ها در طول دوره زمانی ارزیابی، نتایج نشان می‌دهد که سیستم مورد مطالعه با سیستم ذخیره‌سازی فصلی به ضریب عملکرد کلی بین ۳/۶ تا ۷/۸ رسیده است [۱۵].

در کارهای مشابه، عملکرد سیستم ذخیره‌سازی سرما در اقلیم‌های متفاوت ایران بررسی نشده و بحث اقتصادی این موضوع با توجه به تعرفه‌های برق ایران مسئله بسیار مهمی است. در این تحقیق، سیستم ذخیره‌سازی سرما با مخزن یخ با استراتژی ۸ و ۱۶ ساعته برای یک ساختمان اداری در اقلیم‌های گوناگون ایران شبیه‌سازی شده است. ساختمان مورد بررسی ساختمان چهارطبقه همراه با زیرزمین و زیربنایی بالغ بر ۳۱۰۶ مترمربع است. در این مطالعه، عملکرد سیستم ذخیره‌سازی سرما در شش شهر مختلف کشور ایران بررسی شده است. اثر این سیستم روی مصرف انرژی برای ذخیره و تخلیه مخزن ذخیره سرما بررسی شده است و در نهایت مقایسه‌ای روی مصرف برق چیلر در حالت بدون و با سیستم ذخیره‌سازی سرما شبیه‌سازی شده و اثر این موضوع بر ضریب عملکرد سیستم مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق، سیستم ذخیره‌سازی سرما به این صورت کار می‌کند که ابتدا روی کویل لایه‌های یخ تشکیل شده و سپس از داخل کویل سیال ثانویه عبور کرده تا خنک شود. سیال ثانویه خنک‌شده برای تأمین بار سرمایشی ساختمان استفاده می‌شود. همچنین در این بررسی،

1. Building Combined cooling, Heating and Power

توانایی ایجاد تبرید مستقیم با دماهای 2°C تا 6°C را نیز داشته باشند. در جدول (۱) مشخصات تجهیزات مدار شبیه‌سازی شده آورده شده است. پرشدن مخزن ذخیره از ساعت ۲۴ تا ۷ و تخلیه سیستم از ساعت ۸ تا ۱۹ انجام می‌شود.



شکل (۱): مدار شبیه‌سازی شده سیستم ذخیره‌سازی سرما در یخ

جدول (۱): مشخصات تجهیزات در مدار شبیه‌سازی شده [۱۶]

مشخصات پمپ‌ها			
محل قرارگیری پمپ	نرخ جریان ماکزیم (m ³ /s)	هد پمپ (pa)	راندمان موتور پمپ
حلقه برج خنک‌کن	---	۱۷۹۳۵۲	۰/۹
حلقه چیلر و مخزن	۰/۰۰۱۳۵۰۹	۱۷۹۳۵۲	۰/۹
ذخیره	۰/۰۰۱۳۵۰۹	۱۷۹۳۵۲	۰/۹

مشخصات چیلر			
نوع چیلر	ظرفیت	COP	نوع کندانسور
تراکمی	---	۳/۲	آب خنک ^۱

مشخصات برج خنک‌کن	
نوع برج خنک‌کن	نام برج خنک‌کن در حلقه
تک‌سرعت	برج اصلی ^۲

۲.۳. ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی

مشخصات کامل ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی سرما توسط نرخ ذخیره و تخلیه در معادله زیر بیان شده است [۵].

$$\dot{Q}_{ice} = u \times \frac{Q_{TES}}{\Delta t} \quad (1)$$

که \dot{Q}_{ice} عبارت است از نرخ ذخیره (+) یا تخلیه (-) سیستم ذخیره‌سازی سرما برحسب (KW)؛ Q_{TES} ظرفیت ذخیره‌سازی برحسب (KWh)؛ u نرخ ذخیره یا تخلیه (به صورت کسری)؛ Δt فاصله زمانی شبیه‌سازی برحسب ساعت (h).

سه حالت عملیاتی را می‌توان در سرتاسر نرخ ذخیره یا تخلیه به‌طور پیوسته در نظر گرفت که عبارت‌اند از: حالت استراحت ($u=0$).

1. Water-cooled
2. Main Tower

مصرف برق چیلر در حالت با و بدون سیستم ذخیره‌سازی سرما در شرایط آب‌وهوایی شهر اراک مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. سیستم ذخیره‌سازی سرما به روش استاتیکی

در سیستم‌های استاتیکی، تولید و ذخیره یخ در یک جا انجام می‌شود. در این روش جریان میرد در داخل لوله باعث انجماد آب و تشکیل یخ روی کویل داخل مخزن می‌شود. پس از آنکه مرحله تولید یخ به اتمام رسید، برای بهره‌برداری می‌توان به دو صورت عمل کرد:

۱. ذوب شدن یخ با استفاده از سیال ثانویه‌ای که در داخل لوله جریان دارد؛
۲. ذوب شدن یخ با استفاده از سیال ثانویه‌ای که در اطراف لوله جریان دارد.

در این تحقیق روش اول بررسی شده است. در سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما که به‌صورت روش اول عمل می‌کنند، از میرد ثانویه به‌عنوان سیال ذخیره و تخلیه استفاده می‌شود. این سیال در داخل کویل‌های غوطه‌ور در تانکر حاوی آب به گردش درمی‌آید. چیلر برای ساخت یخ، میرد را تا دمای 3°C تا 6°C سرد می‌کند و یخ روی سطح بیرونی لوله‌ها تشکیل می‌شود. برای استفاده از یخ تشکیل‌شده، سیال گرم داخل لوله‌ها جریان می‌یابد و یخ را از سمت داخل لوله ذوب می‌کند. بدین ترتیب دمای میرد کاهش یافته و برای تأمین بار برودتی استفاده می‌شود. در این مورد از سیستم‌ها معمولاً تانکرهای ذخیره‌سازی سرما با چیلر به‌صورت سری قرار می‌گیرند.

۳. شبیه‌سازی

در این بخش مشخصات و نحوه شبیه‌سازی مدار ذخیره‌سازی سرما معرفی می‌شود.

۳.۱. مدار سیستم ذخیره‌سازی سرما

مداری که در شکل (۱) نشان داده شده، برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار انرژی پلاس کمک گرفته شده است. در این سیستم، چیلر در پایین‌دست مدار ذخیره‌سازی سرما قرار گرفته است. در ترکیبی که چیلر در پایین‌دست قرار گرفته است، آب گرم برگشتی ابتدا وارد تانکر ذخیره می‌شود و قبل از ورود به چیلر سرد می‌شود. این چیدمان باعث افزایش ظرفیت قابل استفاده سرمای ذخیره‌سازی شده و ایجاد دمای تخلیه ثابت می‌گردد.

تانکرها در این نوع سیستم معمولاً به‌صورت موازی با هم وصل می‌شوند تا جریان مساوی از تمام تانکرها عبور کند. چیلرهایی که برای این نوع سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما انتخاب می‌شوند، باید علاوه بر توانایی ایجاد دماهای 3°C تا 6°C برای انجماد آب،

حالت ذخیره ($u > 0$) و حالت تخلیه ($u < 0$).

حالت ذخیره

در این حالت، چیلر اختصاص یافته به سیستم ذخیره سازی سرما، یخ را در نرخ ذخیره (u) تا ظرفیت کافی تولید می کند. بعد از هر گام زمانی Δt ، سطح یخ تشکیل شده در سیستم ذخیره سازی سرما (X)، با استفاده از معادله (۲) افزایش می یابد [۵].

$$x_t = u\Delta t + x_{(t-\Delta t)} \quad (2)$$

که X_t سطح یخ تشکیل شده در زمان حال و $X_{(t-\Delta t)}$ سطح یخ تشکیل شده در زمان قبلی می باشد.

حالت تخلیه

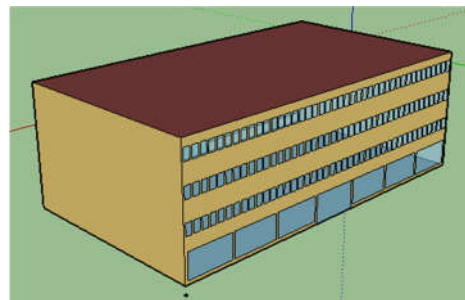
سیستم ذخیره ساز سرما با ظرفیت سرمایشی خود بار سرمایشی تقاضا شده را تأمین می کند و این بار تقاضا شده توسط نرم افزار محاسبه می شود. ظرفیت سرمایشی از سیستم ذخیره سازی سرما با توجه به نرخ تخلیه ($u < 0$) تعیین می شود. نرخ دبی جرمی آب در سیستم ذخیره سازی سرما توسط معادله (۳) از بار سرمایشی تأمین شده توسط سیستم ذخیره ساز سرما و اختلاف دمای آب ورودی با دمای خروجی تنظیم شده به دست می آید [۵].

$$\dot{m}_{ice} = \frac{\dot{Q}_{ice}}{C_{p,water}(T_{inlet} - T_{Loopsetpoint})} \quad (3)$$

که \dot{m}_{ice} عبارت است از نرخ دبی جرمی آب سیستم ذخیره ساز سرما بر حسب (kg/s)؛ \dot{Q}_{ice} بار سرمایشی بر حسب (W)؛ $C_{p,water}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب بر حسب ($\text{J/Kg}^\circ\text{C}$)؛ T_{inlet} دمای آب ورودی ($^\circ\text{C}$)؛ $T_{Loopsetpoint}$ دمای آب خروجی تنظیم شده بر حسب ($^\circ\text{C}$).

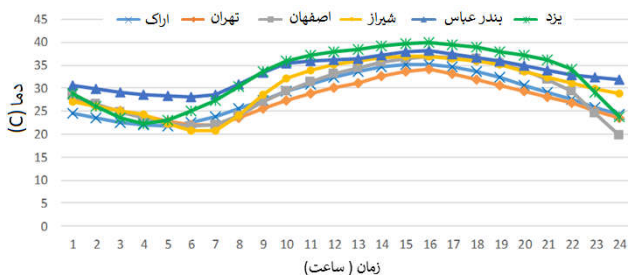
۳.۳. مشخصات ساختمان

برای شبیه سازی در ابتدا باید ساختمان و سیستم تهویه مطبوع مدل سازی شوند و در ادامه سیستم ذخیره ساز سرما به مدل سازی اضافه می گردد. در این شبیه سازی، سیستم هوای ساختمان به صورت VAV^2 می باشد و ساختمان کاربری اداری دارد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختمان اداری شبیه سازی شده

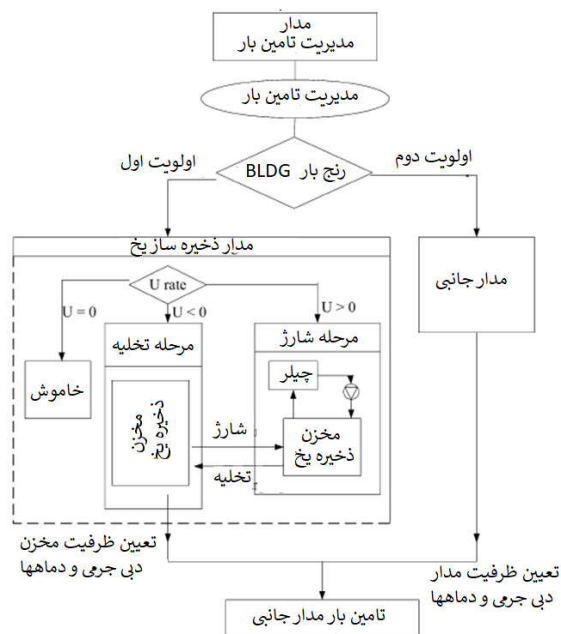
حجم کلی این ساختمان از یک مکعب مستطیل با طول ۳۶ متر، عرض ۲۰ متر و ارتفاع مفید ۱۲ متر تشکیل شده است. سطح جدار نور گذر در پوسته خارجی ساختمان ۲۹۵۹/۳ مترمربع بوده و حدود ۲۸/۹٪ از سطح دیوار خارجی را شامل می شود. مشخصات دیوارهای خارجی و پنجره ها که با چه ساختاری تشکیل شده اند، در جدول (۲) آمده است. در این تحقیق، مقایسه روی عملکرد سیستم ذخیره ساز سرما در شرایط آب و هوایی مختلف صورت گرفته است. در جدول (۳) مشخصات شش شهر مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. شکل (۳) پروفیل دمایی شهرهای مورد بررسی را در ۲۴ ساعته در میانه تابستان نشان می دهد. در این شکل، ماکزیمم دما در ساعت ظهر برای شهر یزد می باشد و مینیمم دما برای شهر اصفهان در ساعت ۱۲ شب رخ داده است.



شکل (۳): پروفیل دمایی شهرهای مورد تحقیق [۱۷]

۴. الگوریتم حل

برای شبیه سازی عملکرد حرارتی ساختمان از نرم افزار کریر استفاده شده است. به کمک نرم افزار کریر تلفات حرارت و بار برودتی مورد نیاز ساختمان محاسبه شده است. در ابتدا اطلاعات آب و هوایی شهر مدنظر در نرم افزار معرفی شده است و سپس اطلاعات جداره های ساختمان اعم از دیوار، سقف، کف، در و پنجره ساختمان مورد نظر برای نرم افزار تعریف می شوند. برای شبیه سازی عملکرد مدار خنک کاری و ذخیره ساز سرما از نرم افزار انرژی پلاس کمک گرفته شده است. در ابتدا فرض شده که مخزن ذخیره پر از یخ است و سپس اجازه ذخیره و تخلیه در طول روز به مخزن داده می شود. شکل (۴) روند شبیه سازی مدار در نرم افزار انرژی پلاس نشان داده شده است. در این نرم افزار سه حالت عملیاتی سیستم ذخیره ساز سرما که عبارتند از حالت استراحت، حالت ذخیره و حالت تخلیه، شبیه سازی می شود. شکل (۴) به عملکردهای بین سیستم ذخیره ساز سرما و دیگر سیستم های موجود اشاره شده است.



شکل (۴): طرح‌واره عملیاتی و مدل اجرایی سیستم ذخیره‌سازی سرما در یخ در نرم‌افزار انرژی پلاس [۶]

جدول (۲): مشخصات ساختمان [۱۶]

مشخصات دیوارهای خارجی ساختمان مورد نظر

جهت دیوار خارجی	تعداد پنجره	ارتفاع و عرض پنجره	نام ساختار پنجره
شمالی	۱۲۶	۰/۶۵ و ۱/۱	Dbl Clr 3mm/13mm Air
جنوبی	۱۲۶	۰/۶۵ و ۱/۱	Dbl Clr 3mm/13mm Air
شرقی	-	-	-
غربی	-	-	-

مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده دیوارهای خارجی ساختمان مورد نظر

نام لایه‌های تشکیل دهنده دیوار	ضخامت (m)	هدایت (W/mK)	چگالی (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (J/kgK)	ضریب جذب
WD01	۰/۰۱۹۰۹	۰/۱۱۵	۵۱۳	۱۳۸۱	۰/۷۸
PW03	۰/۰۱۲۷	۰/۱۱۵	۵۴۵	۱۲۱۳	۰/۷۸
IN02	۰/۰۰۹۹	۰/۰۴۳۰	۱۰	۸۳۷	۰/۷۵
GP01	۰/۰۱۲۷	۰/۱۶	۸۰۱	۸۳۷	۰/۷۵

مشخصات لایه‌های تشکیل دهنده پنجره‌های ساختمان مورد نظر

نام لایه‌های تشکیل دهنده پنجره	ضریب عبور	ضخامت (m)	ضریب هدایت (W/mK)	ضریب بازتابش (SR) ^۱	ضریب بازتابش (VR) ^۲
CLEAR 3MM	۰/۸۳۷	۰/۰۰۳	۰/۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۱
AIR 13MM	-	۰/۰۱۲۷	-	-	-
CLEAR 3MM	۰/۸۳۷	۰/۰۰۳	۰/۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۱

1. Front and Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence
2. Front and Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence

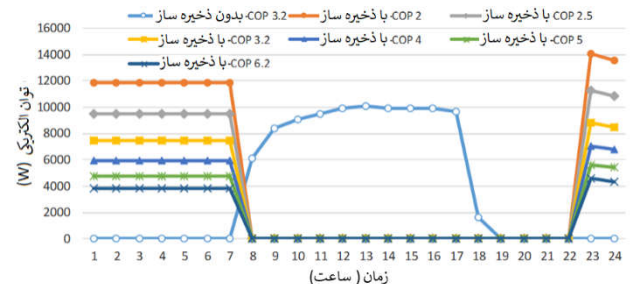
جدول (۳): نوع اقلیم شهرهای مورد بررسی [۱۷]

نام شهر	اراک	تهران	شیراز	یزد	بندرعباس	اصفهان
نوع اقلیم	سرد	گرم و خشک	گرم و خشک	گرم و خشک	گرم و مرطوب	گرم و خشک
طول جغرافیایی	-۴۹	-۵۱	-۵۲	-۵۴	-۵۶	-۵۱
عرض جغرافیایی	۳۴	۳۵	۲۹	۳۱	۲۷	۳۲
ارتفاع از سطح دریا	۱۷۰۸	۱۱۹۱	۱۴۸۸	۱۲۳۰	۱۰	۱۶۰۰

۵. نتایج

۵.۱. عملکرد سیستم ذخیره‌ساز سرما

شکل (۵) مصرف برق چیلر در حالت با و بدون مخزن ذخیره‌ساز سرما برای ساختمانی در شهر اراک را نشان می‌دهد. مقدار مصرف برق در حالت استفاده کردن از مخزن ذخیره‌سازی سرما نسبت به حالت استفاده نکردن از مخزن ذخیره کمتر است. مطابق شکل (۵)، اگر ضریب عملکرد چیلر را در حالت استفاده از مخزن ذخیره افزایش دهیم، مقدار مصرف برق چیلر نسبت به حالت استفاده نکردن از مخزن ذخیره کاهش می‌یابد؛ که در نتیجه سیستم ذخیره‌سازی سرما مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌شود. به کمک به کار بردن سیستم ذخیره‌ساز سرما در حالتی که ضریب عملکرد سیستم‌ها یکسان باشند، حداقل ۲۶٪ از مصرف برق نسبت به حالت بدون استفاده از سیستم ذخیره‌ساز سرما را می‌توان کاهش داد.



شکل (۵): مصرف برق چیلر در ضریب عملکردهای مختلف

۵.۲. مصرف انرژی سیستم برای اقلیم‌های مختلف

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌کنید، مصرف انرژی برای شش شهر مورد نظر محاسبه شده‌اند. در ابتدای شروع به کار ساختمان، به دلیل وجود بار گرمایشی که از روز قبل در جداره‌های ساختمان ذخیره شده است، افزایش بار در ساعات ابتدایی دیده می‌شود. با توجه به شکل (۶) می‌توان دریافت که اگر سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما در شهرهای گرمسیر به کار گرفته شوند، تأثیر بیشتری روی جابه‌جایی پیک شبکه برق کشور خواهند داشت. شهرهای اراک، تهران و اصفهان دارای مصرف انرژی تقریباً یکسانی هستند.

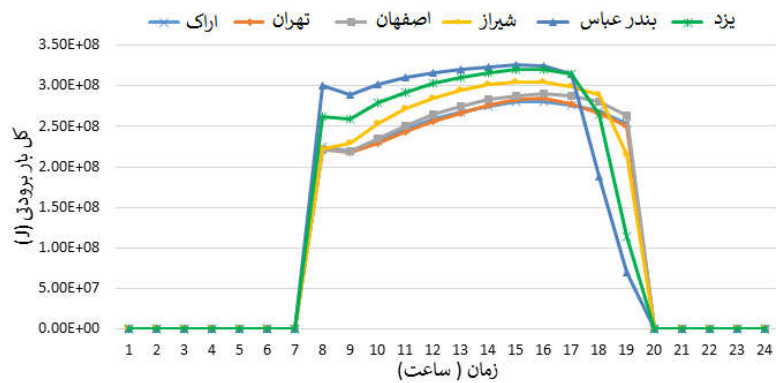
در شبیه‌سازی انجام‌شده، تأثیر اقلیم آب‌وهوایی شهرهای مختلف ایران بر مصرف انرژی ذخیره و تخلیه مخزن بررسی شده که در شکل (۷) مصرف انرژی تخلیه شدن مخزن ذخیره نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷)، مصرف انرژی از مخزن ذخیره برای شهر بندرعباس در ساعت ۱۴ نسبت به شهرهای دیگر، افت قابل توجهی داشته است؛ که این افت به دلیل شرایط آب‌وهوایی موجود در بندرعباس می‌باشد. با اینکه دمای خشک هوا در این شهر نسبت به شهرهای دیگر بیشتر است، به دلیل وجود رطوبت زیاد، در ساعات ۱۳ به بعد میزان برخورد تشعشع خورشید به ساختمان کاهش می‌یابد و در نتیجه نیاز به مصرف انرژی تخلیه کمتری نسبت به شهرهای دیگر محاسبه می‌شود. در زمان پیک شبکه سراسری برق کشور، شهر بندرعباس که در اقلیم گرم و مرطوب قرار می‌گیرد، مصرف انرژی بیشتری نسبت به دیگر شهرها دارد. بنابراین از شبیه‌سازی انجام‌شده می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما در مناطق گرمسیر تأثیر بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۸)، می‌توان دید که مصرف انرژی چیلر در زمان ذخیره‌سازی ثابت بوده است؛ این موضوع یکی از خصوصیات سیستم ذخیره‌ساز سرماست که باعث کاهش مصرف انرژی شده و از هدررفت انرژی جلوگیری می‌کند.

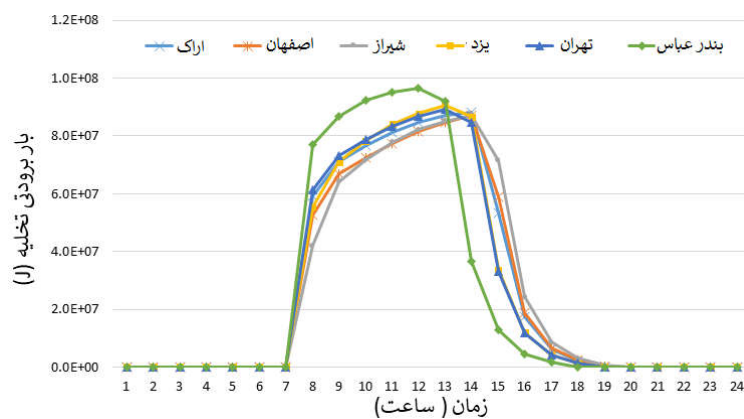
۳.۵. بررسی اقتصادی سیستم ذخیره‌ساز سرما

برای انتخاب سیستم مقرون‌به‌صرفه، ابتدا باید با استفاده از بار سرمایشی ساختمان ظرفیت چیلر و سپس ظرفیت مخزن ذخیره سرما را محاسبه کرد. بار ساختمان در ساعت ۱ تا ۴ به صورت پیک می‌باشد و این پیک با پیک شبکه برق سراسری کشور همزمان است. بنابراین می‌توان با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز سرما برای کاهش پیک تقاضا یا پیک‌سایی کمک گرفت. تکنولوژی ذخیره‌ساز کامل برای جابه‌جایی پیک مصرف برق مؤثرتر است. در گام بعدی باید ظرفیت مناسب چیلر و حجم مخزن به دست آید. ذخیره‌سازی کامل در این تحقیق به دو صورت ذخیره‌سازی ۸ و ۱۶ ساعته در نظر گرفته شده است. معمولاً در حالت ۱۶ ساعته حجم تجهیزات کوچک‌تر می‌شوند. در جدول (۴)، ظرفیت

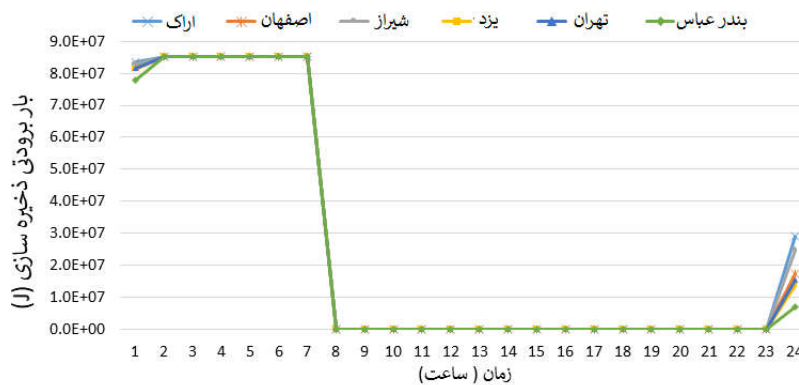
مخزن مناسب هر روش محاسبه و اعلام شده است.



شکل (۶): انرژی مصرف شده برای سرمایش برای شش شهر مختلف ایران



شکل (۷): مصرف انرژی تخلیه شدن مخزن ذخیره برای شهرهای مختلف ایران



شکل (۸): مصرف انرژی برای پر شدن مخزن ذخیره برای شهرهای مختلف ایران

برای قضاوت در رابطه با سیستم مقرون به صرفه باید بررسی شود که مقدار سرمایه‌گذاری اضافی که در سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما حاصل شده است، آیا می‌تواند با توجه به کاهش مصرف سالیانه جبران گردد یا خیر؟ برای تحلیل اقتصادی باید تعرفه برق در ساعات کم‌باری، میان‌باری و اوج بار در محاسبه هزینه برق مصرفی اعمال شود. برای مثال در شهری مانند اراک در طی یکسال، چیلر ۴ ماه از سال روشن است. با توجه به کاربرد اداری می‌توان میزان روشن بودن چیلر را ۱۰۴

جدول (۴): ظرفیت و حجم مخزن ذخیره

تکنولوژی ذخیره‌سازی یخ روی کویل		استراتژی کاری / نوع تکنولوژی
حجم تانک (m ³)	ظرفیت تانک (تن-ساعت)	
۴۴/۸۳	۶۳۷/۴۴	ذخیره‌سازی کامل ۸ ساعته
۲۵/۹۱	۳۶۸/۳۷	ذخیره‌سازی کامل ۱۶ ساعته
۲۴/۴۶	۳۴۷/۷۶	ذخیره‌سازی جزئی

برابر با ۰/۷۵ در قیمت میان‌باری است. برای ذخیره‌سازی جزئی، چیلر در ۲۴ ساعت کار می‌کند و در این استراتژی، برابر با ۰/۹۸۵ است. برای سرمایه‌ش متداول ساختمان، چیلر ۸ ساعت در زمان کم‌باری، ۴ ساعت در زمان اوج بار و ۱۲ ساعت در زمان میان‌باری روشن است. در نتیجه ضریب این دوره برابر با ۱/۳۲ است. تحلیل اقتصادی روی سه تکنولوژی ذخیره‌یخ طبق جدول (۵) صورت گرفته است. مصرف برق هرکدام از چیلرها در جدول (۶) ارائه شده‌اند.

جدول (۵): هزینه‌های مربوط به تحلیل اقتصادی مربوط به سال ۱۳۹۵ (تمامی هزینه‌ها برحسب میلیون ریال هستند)

استراتژی	ظرفیت اسمی چیلر (تن تبرید)	چیلر	مخزن	هزینه‌های جانبی	سیال واسطه	هزینه اولیه	مصرف برق (Kwh)	Rial/Kwh	هزینه سالانه انرژی مصرفی
سرمایش مستقیم	۶۳/۴	۹۳۵	-	۹۳/۵	-	۱۰۲۸/۵	۶۷۲	۲۳۷۷	۱۶۶
۸ ساعته در یخ	۱۰۶/۲	۱۳۴۲	۵۵۰/۲	۱۳۴/۲	۲۰/۱۳	۲۰۴۶/۵	۷۰۴	۹۰۰/۵	۶۶
۱۶ ساعته در یخ	۵۴/۶	۷۷۰	۳۲۳/۴	۷۷	۱۱/۵۵	۱۱۸۲	۷۰۴	۱۳۵۰	۹۹
جزئی در یخ	۳۲/۲	۶۹۳	۳۹۵	۶۹/۳	۱۰/۴	۱۱۶۷/۷	۸۶۴	۱۷۷۰	۱۵۹

طرحی است که دارای کمترین هزینه باشد. بدیهی است در این صورت درآمد همه طرح‌های رقیب هرچند که نامعلوم است، مساوی فرض می‌شوند. ارزش فعلی خالص مطابق رابطه (۴) قابل محاسبه است [۱۸]:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

که در آن، B_t و C_t به ترتیب منافع و هزینه‌ها در سال t ، r نرخ تنزیل و T گستره زمانی یا به عبارتی عمر طرح است. اگر برای یک پروژه ارزش فعلی خالص کوچک‌تر از صفر باشد ($NPV < 0$) آن پروژه غیراقتصادی خواهد بود. منفی بودن NPV نشان می‌دهد که ارزش فعلی هزینه‌ها بیش از ارزش فعلی درآمدهاست و چنانچه $NPV > 0$ باشد، ارزش فعلی هزینه‌ها کمتر از ارزش فعلی درآمدها بوده و طرح اقتصادی است. اگر برای پروژه‌ای $NPV = 0$ باشد آن پروژه نیز اقتصادی است.

با توجه به این موضوعات، برای سه روش ذخیره‌سازی سرما در یخ محاسبات مربوط به ارزش فعلی خالص و دوره بازگشت سرمایه انجام شده‌اند؛ که در جدول (۷) و (۸) آمده است. از این جداول مشخص است که روش ذخیره‌سازی سرما در یخ به صورت ۱۶ ساعته، دارای NPV مثبت بوده و دیگر روش‌ها دارای NPV منفی هستند. بنابراین ذخیره‌سازی ۱۶ ساعته در مقایسه با روش‌های دیگر مقرون‌به‌صرفه‌تر است و برای این روش دوره بازگشت سرمایه ۲/۳ سال محاسبه شده است.

جدول (۷): محاسبه ارزش فعلی خالص طرح (هزینه‌ها به میلیون ریال هستند)

نوع روش ذخیره‌سازی	هزینه نسبت به حالت متداول (C)	درآمد سالیانه (B)	نرخ تنزیل (r)	NPV در طی مدت ۳ سال (t)
۸ ساعته در یخ	۱۰۱۸	۱۰۰	٪۱۰	-۱۶۹۷/۹
۱۶ ساعته در یخ	۱۵۳/۵	۶۷	٪۱۰	+۱۳/۱۱
جزئی در یخ	۱۳۹/۲	-۷	٪۱۰	به دلیل عدم وجود درآمد، NPV این طرح منفی است.

جدول (۶): مصرف برق چیلر

استراتژی	مصرف برق چیلر Kw
ذخیره‌سازی ۸ ساعته در یخ	۸۸
ذخیره‌سازی ۱۶ ساعته در یخ	۴۴
ذخیره‌سازی جزئی در یخ	۳۶

مقایسه اقتصادی پروژه‌ها، با اهمیت‌ترین نوع تصمیم‌گیری است. روش متداول در این نوع مسائل، روش ارزش فعلی خالص (NPV) و دوره بازگشت سرمایه هستند.

روش ارزش فعلی خالص یا معادل زمان حاضر، یکی از طرق متداول برای ارزیابی و مقایسه طرح‌هاست. در این روش، جریان‌های وجوه چه به صورت درآمد و چه به شکل هزینه، به مبدأ زمان (زمان حال) انتقال می‌یابند. این امر با توجه به یک حداقل نرخ قابل قبول، که به آن نرخ تنزیل گویند و نشان‌دهنده ارزش زمانی پول است، صورت می‌گیرد. منظور از زمان حال، ابتدای سال شروع سرمایه‌گذاری است که در اصطلاح اقتصاد مهندسی، سال صفر نامیده می‌شود. ارزش فعلی خالص یک پروژه از جمع جبری دو بردار (درآمد و هزینه) به دست می‌آید. پس از تبدیل جریان نقدی طرح‌های مختلف به زمان حاضر، ارجحیت انتخاب با گزینه‌ای است که دارای بیشترین ارزش فعلی خالص باشد. برای مواردی که درآمد طرح‌ها قابل پیش‌بینی نباشد، الویت با

جدول (۸): محاسبه دوره بازگشت سرمایه (هزینه‌ها به میلیون ریال هستند)

نوع روش ذخیره‌سازی	هزینه‌های اولیه (P)	درآمد سالیانه (CF)	دوره بازگشت سرمایه (n)
۸ ساعته در یخ	۱۰۱۸	۱۰۰	-
۱۶ ساعته در یخ	۱۵۳/۵	۶۷	۲/۳
جزئی در یخ	۱۳۹/۲	-۷	-

۶. نتیجه‌گیری

عملکرد چیلر برای دو حالت سیستم سرمایشی ۳/۲ باشد، با به کار بردن سیستم ذخیره‌ساز سرما برای ساختمان مورد نظر حداقل ۲۶٪ از مصرف برق کاهش یافته است. از شبیه‌سازی انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که سیستم‌های ذخیره‌ساز سرما در مناطق گرمسیر دارای تأثیر بیشتری نسبت به مناطق دیگر برای پیک سایبی را دارند. بررسی اقتصادی ذخیره‌ساز سرما برای دو روش ذخیره‌ساز سرمای ۸ و ۱۶ ساعته انجام شد. نتایج بررسی اقتصادی برای ساختمان مورد نظر نشان داد که سیستم ذخیره‌سازی سرما در یخ با استراتژی کامل ۱۶ ساعته مقرون‌به‌صرفه بوده و دوره بازگشت سرمایه آن ۲/۳ سال است.

در این مقاله، شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌ساز سرما در یخ به روش استاتیکی در حالت ذوب شدن یخ‌های روی کویل توسط مبردی که از داخل کویل‌ها حرکت می‌کنند، برای یک ساختمان اداری توسط نرم‌افزار انرژی پلاس انجام شد. مصرف انرژی ذخیره و تخلیه شدن مخزن ذخیره یخ برای اقلیم آب‌وهوایی مختلف (تهران، اراک، یزد، بندرعباس، اصفهان و شیراز) بررسی شده است. مصرف برق چیلر با ضریب عملکردهای متفاوت در حالت ذخیره‌سازی سرما نسبت به حالت بدون ذخیره‌سازی نیز بررسی شد؛ که بهترین حالت مربوط به چیلر همراه با سیستم ذخیره‌سازی سرما می‌باشد. در حالتی که ضریب

مراجع

- [۱] کاظمی، جعفر، لشکری‌مین، فرزاد، «مطالعه امکان استفاده از سیستم ذخیره‌ساز سرما به روش یخ بسته‌بندی شده در ایران»، اولین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، صفحه ۲۰۸، ۱۳۸۸.
- [۲] انصاری، محمدامین، «به‌کارگیری سیستم‌های TES در بارهای سرمایشی مشترکین»، دهمین کنفرانس سراسری شبکه‌های توزیع نیروی برق، صفحه ۴۲۰-۴۲۷، ۱۳۸۴.
- [3] Elleson, J.S. and Dorgan, C.E., "Design Guide for Cool Thermal Storage", ASHRAE, ISBN 1-883413-07, 1993.
- [4] Sanaye, S. and Shirazi, A. "Thermo-Economic Optimization of an Ice Thermal Energy Storage System for Air-Conditioning Applications", Energy and Buildings Vol.60, pp. 100-109, 2013.
- [5] Ihm, P., Krarti, M., Gregor, P., and Henze, "Development of a Thermal Energy Storage Model for Energy Plus", Energy and Buildings Vol. 36, pp. 807-814, 2004.
- [6] Ruan, Y., Liu, Q., Li, Z. and Wu, J., "Optimization and Analysis of Building Combined Cooling, Heating and Power (BCHP) Plants with Chilled Ice Thermal Storage System", Applied Energy Vol.179, pp.738-754, 2016.
- [7] 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. 15, S1359-4311-01355-1, 2015.
- [8] Wu, C.T. and Tsai, Y.H., "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.
- [9] 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. 15, S0140-7007(15)00309-6, 2015.
- [10] Rahdar, M. H., Heidari, M., Ataei, A. and Choi, J.K., "Modeling and Optimization of R-717 and R-134a Ice Thermal Energy Storage air Conditioning Systems Using NSGA-II and MOPSO Algorithms", Applied Thermal Engineering, Vol. 96, pp. 217-227, 2016.
- [11] Song, X. and Zhu, T., "Study on Optimal Ice Storage Capacity of Ice Thermal Storage System and Its Influence Factors", Energy Conversion and Management Vol.164, pp. 288-300, 2018.
- [12] Yang, T. and Sun, Q., "The Impact of Refrigerant Inlet Temperature on the Ice Storage Process in an Ice - on - Coil Storage Plate", Energy Procedia Vol. 145, pp. 82-87, 2018.
- [13] Kaneko, Y., Kobiyama, M., Nagaoke, H. and Sato, T., "Air-Conditioning System for Apartment Residences by Using Water Made from Snow", Paper for ISCORD 2000. Conference in Hobart, Australia; 2000.
- [14] Näslund M., "District Cooling in Sundsvall Based on Sea Water and Stroed Snow", Master thesis 2000:132 CIV, Luleå University of Technology. Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering, Sweden; 2000.
- [15] Henze, G.P. and Krarti, M., "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory", Final Report for Phase I: Analysis, Modeling, and Simulation. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory Cooperative Agreement DE-FC-26-01NT41255, December, 2002.
- [۱۶] کناری، غلامعلی، «ممیزی انرژی ساختمان مرکزی شرکت گاز استان مرکزی»، مشاوران خدمات انرژی آریان بهسا، ۱۳۹۲.
- [17] <http://geonames.usgs.gov/>
- [۱۸] اسکونژاد، محمد، «اقتصاد مهندسی ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی»، چاپ هفتم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۵.