

فناوری سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما در تهویه مطبوع ساختمان‌ها و بررسی میزان بهره‌وری آن در یک ساختمان

علی میرمحمدی*، سعید رحیمی

دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

*مسئول مکاتبات: a.mirmohammadi@srttu.edu

چکیده

واژگان کلیدی

ذخیره سازی سرما
سیستم برودتی
بهره‌وری انرژی
انرژی برق مصرفی

سیستم‌های ذخیره‌ی سرما باعث کاهش هزینه‌های برق مصرفی می‌شوند، به این صورت که در ساعات غیر اوج مصرف انرژی الکتریکی، اقدام به تولید و ذخیره‌سازی سرما کرده و در ساعات میان باری و پر باری مصرف برق، از سرمای تولید شده برای خنک‌سازی ساختمان استفاده می‌کنند. با توجه به اختلاف قابل توجه قیمت برق مصرفی در ساعات اوج باری با ساعات کم باری این شیوه باعث کاهش بهای انرژی الکتریکی پرداختی می‌شود. در روش سرمایش مستقیم در ساعاتی از روزهای تابستان اوج باری بر تولید و توزیع برق سراسری کشور تحمیل می‌شود. با توجه به اختلاف قیمت شرایط مختلف برای مصرف کنندگان در این روش هزینه زیادی نیز به خانوارها تحمیل می‌شود بنابراین فناوری سیستم‌های ذخیره‌ی سرما در تنظیم شبکه برق مصرفی در زمان اوج باری کمک زیادی می‌کند. استفاده از فناوری سیستم‌های ذخیره‌ی سرما شامل استراتژی‌های کامل و جزئی با بار ثابت و متغیر می‌باشد که در این مقاله ارائه می‌گردد. سرمایش یک ساختمان نمونه در شهر تهران محاسبه و طراحی سیستم تأمین بار سرمایشی آن با استفاده از سه استراتژی ذخیره سرما معرفی شده انجام و برآورد بهره‌وری هر کدام از سه استراتژی ارائه می‌گردد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۰۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۷/۱۲

۱ مقدمه

این سیستم‌ها در ساعات کم باری، بار سرمایی مورد نیاز برای سرمایش ساختمان را ذخیره کرده و در ساعات اوج مصرف برق از این سرمای ذخیره شده استفاده می‌کنند، در نتیجه سبب کاهش قطعی برق در فصول گرم سال و کاهش فشار بر روی سیستم تولید و توزیع برق می‌شود. استراتژی‌های مختلفی برای استفاده از مجموعه مخزن ذخیره سرما وجود دارد. به کارگیری هر کدام از این استراتژی‌ها به نرخ قیمت برق بستگی دارد. یک استراتژی سیستم ذخیره‌سازی کامل می‌باشد. در این سیستم ظرفیت چیلر برای تهیه سرما در مخزن ذخیره در طول شب به کار گرفته می‌شود و سرمایش در روز توسط مخزن ذخیره سرما انجام می‌شود. استراتژی دوم سیستم ذخیره‌سازی جزئی است. جریان‌های معمول برای یک سیستم ذخیره‌سازی جزئی در شکل‌های ۲الف و ۲ب نشان داده شده است. مطابق شکل ۲الف در مدت شب، محلول آب-اتیلن گلیکول از فن کویل بای پس شده و از چیلر و مبدل حرارتی مخزن ذخیره سرماعبور می‌کند و با دمای خیلی کمی که دارد آب داخل مخزن را سرد می‌کند که این مرحله شارژ مخزن می‌باشد [۱].

مطابق شکل ۲ب در طی روز بخشی از جریان با دمای نسبتاً بالای چیلر از مبدل مخزن سرما عبور کرده و با دمای کمتر در خروج از مبدل با بخش بای پس مخلوط و دمای مورد نیاز فن کویل را تأمین می‌کند. این شیوه ظرفیت اسمی چیلر را ۳۰ تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد [۱].

در فصول معتدل سال نظیر بهار و پاییز که ظرفیت اسمی چیلر برای تأمین بار سرمایشی کافی است، مطابق شکل ۳ مخزن ذخیره سرما بای پس شده و چیلر به تنهایی بار سرمایشی را تأمین می‌کند [۱].

امروزه اغلب برای آسایش و راحتی انسان‌ها در فصول گرم سال از انرژی الکتریکی استفاده می‌کنند. گاهی اوقات بالا بودن تقاضا در مصرف برق در ساعات اوج مصرف موجب عدم جوابدهی نیروگاه‌ها و قطعی برق در برخی از ساعات روز می‌شود. همچنین با توجه به حذف یارانه حامل‌های انرژی و افزایش بهای انرژی الکتریکی، مردم به دنبال راهکاری برای کاهش این هزینه‌ها هستند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به مزایای فراوانی چون کاهش یا حتی مجانی شدن بهای برق مصرفی و کاهش آلودگی هوا در نگاه اول راهکار مناسبی است، ولی قیمت بالای این سیستم‌ها و هزینه‌های بالای نصب و نگهداری آن موجب شده تا استقبال چندانی از این سیستم‌ها صورت نگیرد. در حال حاضر استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ی سرما (شکل ۱) می‌تواند راهکار مناسبی برای کاهش هزینه‌های برق مصرفی و حذف اوج مصرف برق باشد.



شکل ۱: مخازن ذخیره سرما [۱]

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما با کاربری تهویه مطبوع در کشورهای پیشرفته از قدمتی در حدود ۲۵ سال برخوردار است، به گونه‌ای که در بسیاری از کشورها استفاده از این سیستم‌ها به عنوان یک گزینه اصلی جهت تأمین مصارف برودتی، نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی از مزیت نسبی برخوردار هستند. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی در کشورهای بلژیک، فرانسه، آلمان، ایتالیا، هلند و غیره شاهدهی بر این ادعا می‌باشد. سیستم‌های ذخیره سرما منابع عالی خنک کننده برای ساختمان‌ها هستند و در زمان‌های کمینه مصرف برق می‌توانند مقدار زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی کنند [۲].

در مرجع [۳] نویسندگان استفاده از سیستم ذخیره سرما در تهویه مطبوع یک ساختمان اداری در کشور مالزی مطالعه کرده‌اند. نتایج مطالعه ایشان نشان داده است که میزان برگشت سرمایه برای ذخیره‌سازی کامل در ۳ تا ۶ سال و برای ذخیره‌سازی جزئی در ۱ تا ۳ سال بر می‌گردد. همچنین بررسی ایشان نشان داده است که ذخیره‌سازی کامل هزینه سالانه را ۳۵٪ و ذخیره‌سازی جزئی در حدود ۸٪ کاهش می‌دهد.

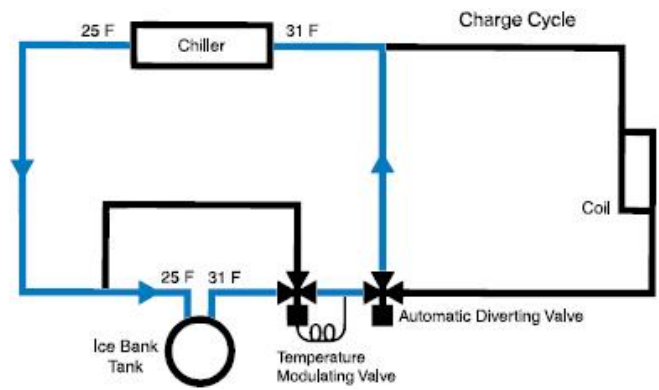
در مرجع [۴] نویسندگان طرح‌ها صرفه جویانه در انرژی سیستم تهویه مطبوع ساختمان را بررسی کرده‌اند. بررسی ایشان نشان داده است که سیستم ذخیره‌سازی سرما گنجایش آب واحد چیلر را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد و به طور کلی مصرف کل برق را کاهش می‌دهد و از طریق قیمت مصرف برق در شب هزینه انرژی را کاهش می‌دهد.

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما با کاربری تهویه مطبوع در کشورهای پیشرفته از قدمتی در حدود ۲۵ سال برخوردار است، به گونه‌ای که در بسیاری از کشورها استفاده از این سیستم‌ها به عنوان یک گزینه اصلی جهت تأمین مصارف برودتی، نسبت به سایر سیستم‌های سرمایشی از مزیت نسبی برخوردار هستند. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی در کشورهای بلژیک، فرانسه، آلمان، ایتالیا، هلند و غیره شاهدهی بر این ادعا می‌باشد. هدف این مقاله معرفی انواع سیستم‌ها و تجهیزات ذخیره‌سازی سرما و کاهش مصرف برق در زمان‌های اوج باری می‌باشد که برآورد صرفه جویی با محاسبات یک مثال نمونه نیز انجام می‌شود.

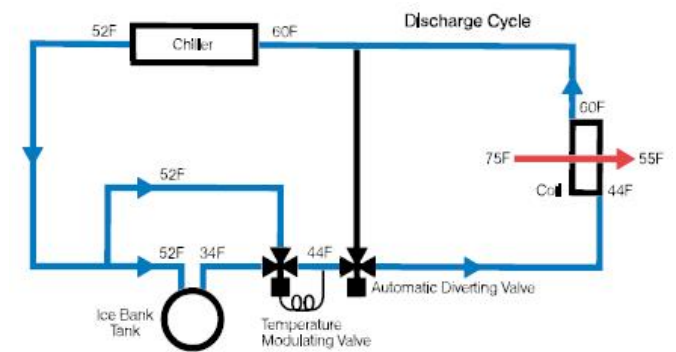
۲ سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما

این سیستم‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی اصلی زیر تقسیم کرد:

۱. سیستم‌های تولید و ذخیره‌ی سرما استاتیکی
در سیستم استاتیک، یخ روی سطح اواپراتور تشکیل می‌شود و تا زمانی که به وسیله بار حرارتی ساختمان ذوب شود در آنجا باقی می‌ماند. این سیستم را یخ‌ساز می‌گویند.
۲. سیستم‌های تولید و ذخیره‌ی سرما دینامیکی
در سیستم دینامیک، یخ در اواپراتور تشکیل می‌شود و سپس در مخازن نگهداری می‌شود. یخ را می‌توان با استفاده از تجهیزات مکانیکی و یا تزریق گاز داغ به داخل ورقه‌های اواپراتور جدا کرد. در بیشتر سیستم‌ها، واحد یخ‌سازی بر روی مخزن نصب می‌شود.
در این مقاله ارزیابی روش ذخیره‌سازی سرما دینامیکی بررسی می‌شود.

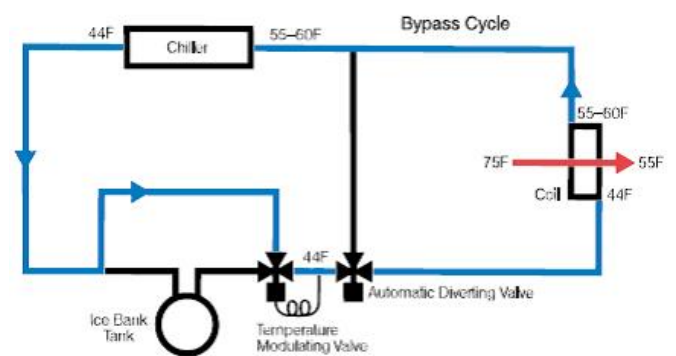


(الف) سیستم ذخیره‌سازی جزئی در مرحله شارژ [۱]



(ب) سیستم ذخیره‌سازی جزئی در مرحله دشارژ [۱]

شکل ۲: سیستم ذخیره‌سازی جزئی در مرحله‌های شارژ و دشارژ [۱]



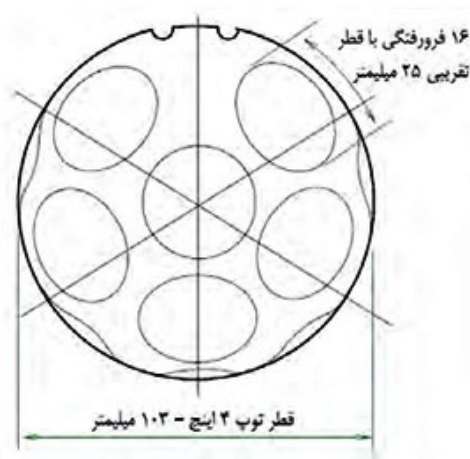
شکل ۳: سیستم ذخیره‌سازی جزئی در مرحله دشارژ [۱]

ذخیره‌سازی حرارتی به فن آوری‌های متعددی اشاره دارد که به ذخیره حرارت، و یا گرما می‌پردازد، این انرژی در یک مخزن ذخیره شده و بعداً مورد استفاده قرار می‌گیرد. از نظر فنی، اصطلاح سرد، فقدان نسبی انرژی حرارتی است. اصول ذخیره‌سازی حرارتی در نگهداری سرما، همان ذخیره‌سازی نسبتاً پایین‌تر گرما است.

قبل از گسترش تجهیزات تبرید مدرن، کشاورزان در زمستان از برش‌های سرما استخرها و دریاچه‌های سرما زده استفاده می‌کردند. این سرما در یک مکان عایق‌بندی شده به خوبی ذخیره می‌شد و بسیاری از آن تا تابستان سرما زده باقی می‌ماند. این امر می‌تواند به جلوگیری از فاسد شدن شیر و سایر محصولات کشاورزی کمک نماید.

۱.۲ مخزن ذخیره‌ی سرما

توپ‌ها ۱۶ عدد فرو رفتگی وجود دارد که هنگام یخ شدن آب امکان افزایش حجم را به توپ می‌دهد. آب درون توپ‌ها در کارخانه پر شده و بدین صورت عرضه می‌گردد. این توپ‌های ذخیره‌ی سرما تولید شرکت کریاژل^۲ می‌باشد که از قدیمی‌ترین شرکت‌های تحقیقاتی و عملیاتی در زمینه‌ی ذخیره‌سازی سرما بوسیله‌ی کیسه‌های ذخیره‌ی سرما می‌باشد. این شرکت محصولات خود را از طریق یک شرکت دیگری در کشور مالزی به آسیا عرضه کرده است. میرد برای شارژ مخزن با دمای ۷- درجه‌ی سانتی‌گراد وارد مخزن شده و در حالت دشارژ با دمای ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد عمل می‌کند. البته برای طراحی این سیستم‌ها اختلاف دمای میانگین لگاریتمی با توجه به دمای میرد ورودی برای حالت‌های شارژ و دشارژ مینا در نظر گرفته شده است. دمای میرد خروجی از مخزن برای سرمایش در حالت دشارژ ظرفیت مخزن ذخیره و بر مبنای تعداد توپ‌های ذخیره‌سازی مشخص می‌شود [۹].



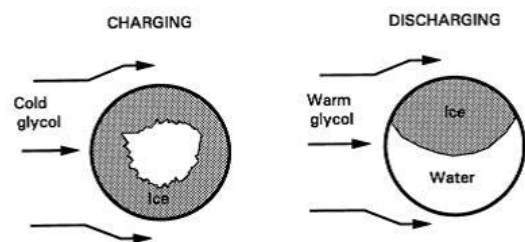
شکل ۵: هندسه توپ‌های ذخیره‌ی سرما

توپ‌ها معمولاً داخل دو نوع مخزن اتمسفریک یا تحت فشار نگهداری می‌شوند. برای هر تن تبرید بار سرمایی ذخیره شده، حجم مخازن تحت فشار ۵۶ تا ۶۳ لیتر و حجم مخازن اتمسفریک ۷۰ تا ۷۶ لیتر در نظر گرفته می‌شود. در این نوع سیستم سرمایشی از چیلرهای سرماساز به جای چیلرهای آب سرد کن استفاده می‌کنند. بنابراین قیمت چیلرها متفاوت خواهد بود. قیمت چیلرهای آب سرد کن بر حسب هر تن تبرید ۲۰۰ تا ۳۰۰ دلار می‌باشد، در حالی که چیلرهای سرماساز ۴۰۰ دلار بر هر تن تبرید قیمت دارند. قیمت توپ‌های ذخیره‌ی سرما برای هر تن تبرید ۵۰ دلار و هزینه‌ی احداث مخزن ذخیره برای هر تن تبرید حدود ۲۰ دلار می‌باشد. در این مقاله هزینه مصرف برق در واحد ریال و هزینه تجهیزات سرمایشی به دلیل وارداتی بودن بر مبنای دلار ارائه می‌گردد. محاسبه جبران هزینه اضافی سیستم تجهیزات سرمایشی با صرفه‌جویی در مصرف برق با نرخ دلار معادل ۴۰,۰۰۰ ریال انجام شده است.

۳.۳ برنامه زمانی و هزینه‌ی برق مصرفی

بهای انرژی الکتریکی برای مصارف آزاد به شرح جدول ۱ می‌باشد.

سیستم‌های مخزن ذخیره‌ی سرما به سیستمی اطلاق می‌شود که در آن آب در یک محفظه پلاستیکی قرار داده شده است و چندین محفظه داخل یک مخزن ذخیره‌سازی قرار داده می‌شوند. مطابق شکل ۴ در زمان شارژ، سیال ثانویه سرد از چیلر زیر صفر وارد مخزن شده و باعث می‌شود آب داخل محفظه پلاستیکی یا توپ پلاستیکی منجمد شود. در زمان دشارژ، سیال ثانویه گرم وارد شده و باعث ذوب شدن سرما داخل توپ‌ها و سرد شدن خود سیال ثانویه می‌شود که این سیال سرد شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخازن مورد استفاده در این سیستم باید اتمسفریک یا مخازن تحت فشار باشند. تکنولوژی ساخت توپ‌های پلاستیکی^۱ در انحصار چند شرکت محدود است [۵].



شکل ۴: نحوه‌ی شارژ و دشارژ توپ‌های ذخیره‌ی سرما

استفاده از مخزن ذخیره سرما مزایای زیر را دارد [۶-۸].

۱. امکان استفاده بهینه از فضاهای موجود در سازه‌های ساختمانی
۲. امکان بکارگیری مخازن فلزی برای سیستم‌های تحت فشار
۳. توانایی بهره‌برداری از مخزن بتنی و فلزی در سیستم‌های با فشار اتمسفر
۴. امکان استفاده از مخازن با شکل مکعب مستطیل یا استوانه
۵. توانایی احداث مخزن در زیر زمین یا زیر خیابان که از لحاظ هزینه‌های مکان‌یابی برای مخزن نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است.

۳ مشخصات ساختمان، سیستم و انرژی مصرفی

۱.۳ مشخصات ساختمان

در این مقاله از سیستم ذخیره‌ی سرما در کیسه‌های سرما برای سرمایش ساختمان مسکونی با ۶ طبقه و در هر طبقه چهار واحد و دارای لابی سالن کنفرانس و اتاق بازی بچه‌ها، واقع در شهر تهران که مساحت کلی فضای تهویه شده ۶۶۲۱/۷ مترمربع می‌باشد، استفاده شده است. برای انجام محاسبات و تحلیل بار سرمایی و سایر مشخصات ساختمان از نرم افزار کریر^۲ استفاده شده است و خروجی‌های برنامه در هر بخش مربوط به گرمترین روز سال می‌باشد.

۲.۳ مشخصات سیستم ذخیره سرما

برای سیستم ذخیره‌ی سرما از توپ‌های نگهدارنده‌ی آب و سرما از جنس پلاستیک پلیمری با کیفیت عالی مطابق شکل ۵ استفاده می‌شود. بر روی

¹Ice Thermal Storage Systems(Greg Henderson) ²carrier (hap 4.5)

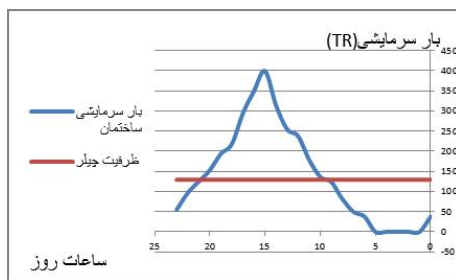
۲.۴ محاسبات استراتژی‌های ذخیره‌سازی سرما

سه روش برای ذخیره‌سازی سرما عبارتند از:

۱. ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت
۲. ذخیره‌سازی کامل با توان برودتی متغیر
۳. ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر

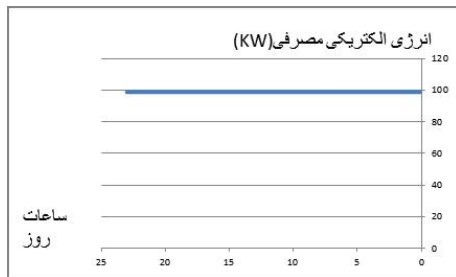
۱.۲.۴ استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت

در این استراتژی کل بار سرمایشی یک روز بر ۲۴ تقسیم می‌شود تا ظرفیت چیلر بدست آید. سپس عدد حاصله با ۱۰٪ ضریب اطمینان به عنوان ظرفیت نهایی چیلر انتخاب می‌شود. به دلیل در نظر گرفتن ضریب اطمینان کم ظرفیت سرمایی چیلر پس از مدتی کاهش می‌یابد و از حالت ایده‌آل خارج می‌شود. شکل ۸ ظرفیت چیلر را در این استراتژی نشان می‌دهد.



شکل ۸: ظرفیت چیلر در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت

شکل ۹ نمودار برق مصرفی سیستم برودتی در شبانه روز را نشان می‌دهد.



شکل ۹: نمودار انرژی الکتریکی مصرفی سیستم برودتی ساختمان در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت

مشخصات سیستم در استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت به صورت جدول ۳ می‌باشد. بررسی این جدول نشان می‌دهد در استراتژی استفاده از سیستم برودتی در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت مبلغ ۷۷۷۵۶/۱ ریال در برق مصرفی و حدود ۱۰۹۶۷ دلار در هزینه اولیه سیستم صرفه‌جویی می‌شود.

۲.۲.۴ استراتژی ذخیره‌سازی کامل با توان برودتی متغیر

در این استراتژی با توجه به ساعات اوج مصرف برق، ساعات اوج گرما و ظرفیت چیلر و سرمایه‌گذاری اولیه در ساعاتی از شبانه روز چیلر خاموش می‌شود و فقط از بار سرمایی مخزن ذخیره استفاده می‌شود و در ساعات دیگر چیلر با ظرفیت ثابت کار می‌کند که بخشی از آن برای سرمایش و مابقی برای تولید سرما استفاده می‌شود. البته ممکن است در بعضی از ساعات کل بار

جدول ۱: انرژی الکتریکی برای مصارف آزاد (کیلووات بر ریال) [۱۰]

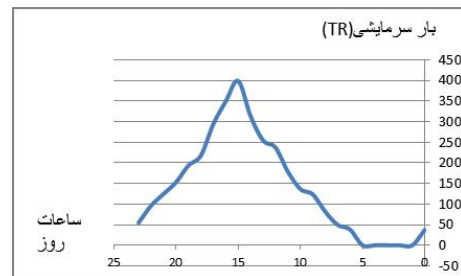
دوره مصرف	کم باری	میان باری	اوج بار
بهای انرژی	۳۶۰/۵	۷۲۱	۱۴۴۲

۴ محاسبات مربوط به روش‌های مختلف تأمین

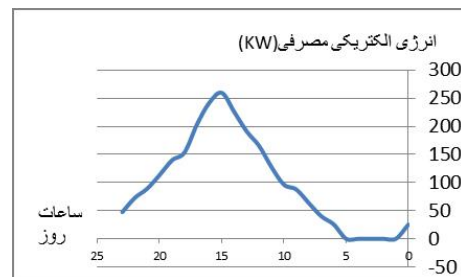
بار سرمایشی ساختمان

۱.۴ محاسبات روش سرمایش مستقیم

نتایج محاسبات کریر برای بار سرمایشی ساختمان در گرمترین روز سال به صورت شکل ۶ محاسبه شده است. در صورتی که از سیستم ذخیره سرما استفاده نشود باید بیشترین مقدار بار سرمایی را به عنوان ظرفیت چیلر انتخاب کرد که هزینه‌ها بیشتر می‌شود. نمودار برق مصرفی سیستم در شبانه روز به صورت شکل ۷ خواهد شد.



شکل ۶: نمودار بار سرمایشی ساختمان در یک شبانه روز



شکل ۷: نمودار انرژی الکتریکی مصرفی سیستم برودتی ساختمان در حالت سرمایش مستقیم

بنابراین در حالت سرمایش مستقیم مشخصات سیستم به صورت جدول ۲ محاسبه می‌شود.

جدول ۲: مشخصات سیستم در حالت سرمایش مستقیم

مقدار	پارامتر
۳۹۸/۸	ظرفیت چیلر واقعی (تن تبرید)
۴۳۸/۶۸	ظرفیت چیلر با ۱۰٪ ضریب اطمینان (تن تبرید)
	حجم مخزن ذخیره در حالت اتمسفریک (لیتر)
	حجم مخزن ذخیره در حالت تحت فشار (لیتر)
۱۰۹۷۰۰	قیمت چیلر (هر تن تبرید حدود ۲۵۰ دلار) (\$)
-	قیمت توپ‌های ذخیره‌ی سرما (\$))
-	هزینه خرید و نصب مخزن ذخیره (\$))
۱۰۹۷۰۰	قیمت تمام شده سیستم (\$))
۱۸۸۱۸۵۵/۵۴	هزینه انرژی الکتریکی مصرفی روزانه (ریال)

¹Ice Bank

۳.۲.۴ استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان بروندی متغیر

این روش را می‌توان حد وسط دو روش ذخیره‌سازی جزئی و بار بروندی ثابت و ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر در نظر گرفت. در این روش طرح مقدار بار بروندی تولید شده توسط چیلر را در ساعات اوج مصرف کاهش می‌دهد. این امر باعث می‌شود تا هزینه‌های برق مصرفی نسبت به روش بار بروندی ثابت کمتر باشد. بنابراین ظرفیت چیلر و اندازه‌ی آن نسبت به روش ذخیره‌سازی جزئی با توان بروندی ثابت کمتر است و می‌توان گفت که روش مناسب‌تری نسبت به دو روش قبلی است. در این روش چیلر از ساعت ۱۵ تا ساعت ۲۳ (۸ ساعت) با ۵۰٪ از ظرفیت خود کار می‌کند. بنابراین برای محاسبه‌ی اندازه‌ی چیلر از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود.

$$8 \times X + (24 - 8) \times 2 \times X = 3098/2$$

$$2 \times X = 154/91$$

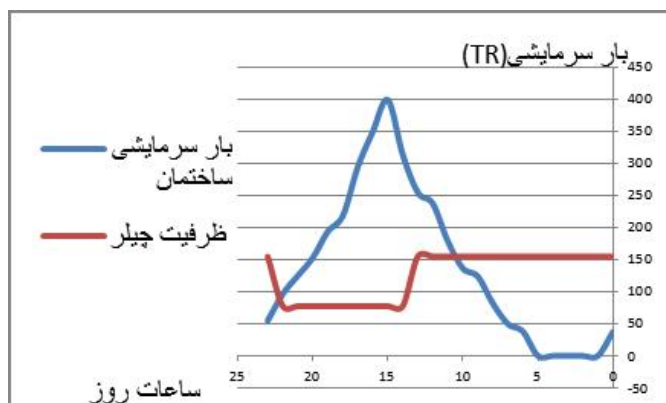
$$X = 77/455$$

بنابراین چیلر در ساعات ۱۵ تا ۲۳ با توان ۷۷/۴۵۵ تن تبرید و در سایر ساعات با توان ۱۵۴/۹۱ تن تبرید کار می‌کند. البته در این استراتژی، ساعات کاری چیلر با ظرفیت کمتر و اینکه چیلر در حالت بار سرمایه‌ی کمتر با چه نسبتی از ظرفیت کل چیلر کار کند در قیمت تمام شده‌ی سیستم و هزینه‌ی برق مصرفی موثر است.

جدول ۴: مشخصات سیستم بروندی در حالت ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر

پارامتر	مقدار
ظرفیت چیلر واقعی (تن تبرید)	۱۹۳/۶۳۷۵
ظرفیت چیلر با ۱۰٪ ضریب اطمینان (تن تبرید)	۲۱۳/۰۱۲۵
حجم مخزن ذخیره در حالت اتمسفریک (لیتر)	-۳۰۳۰۸/۸
	۲۷۹۱۶
حجم مخزن ذخیره در حالت تحت فشار (لیتر)	-۲۵۱۲۴/۴
	۲۲۳۳۲/۸
قیمت چیلر (\$)	۸۵۲۰۰/۵
قیمت توپ‌های ذخیره‌ی سرما (\$)	۱۹۹۴۰
هزینه‌ی خرید و نصب مخزن ذخیره (\$)	۷۹۷۶
قیمت تمام شده‌ی سیستم (\$)	۱۱۳۱۱۶/۵
هزینه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی روزانه (ریال)	۱۲۸۱۴۵۵/۷۳۵۵

شکل ۱۲ ظرفیت چیلر را در این استراتژی نشان می‌دهد.

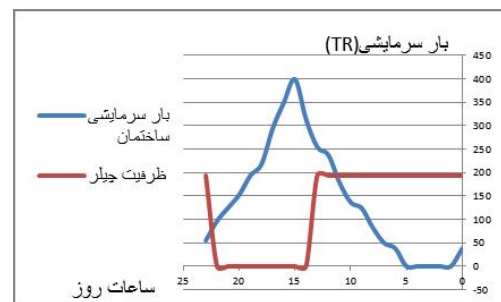


شکل ۱۲: ظرفیت چیلر در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان بروندی متغیر

سرمایه‌ی چیلر برای تولید سرما استفاده شود. هر چه ساعات خاموش بودن چیلر بیشتر باشد بدیهی است که اندازه چیلر را باید بزرگتر انتخاب کرد که هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری بیشتر ولی هزینه‌ی برق مصرفی کمتر می‌شود. شکل ۱۰ ظرفیت چیلر را در این استراتژی نشان می‌دهد.

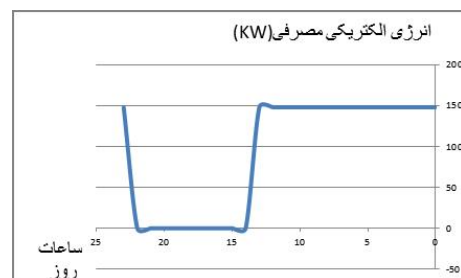
جدول ۳: مشخصات سیستم بروندی در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان بروندی ثابت

پارامتر	مقدار
ظرفیت چیلر واقعی (تن تبرید)	۱۲۹/۰۹
ظرفیت چیلر با ۱۰٪ ضریب اطمینان (تن تبرید)	۱۴۱/۹۹۹
حجم مخزن ذخیره در حالت اتمسفریک (لیتر)	-۲۰۴۹۷/۹۶
	۱۸۱۷۹/۷
حجم مخزن ذخیره در حالت تحت فشار (لیتر)	-۱۶۹۹۱/۷۳
	۱۵۱۰۳/۷۶
قیمت چیلر (\$)	۵۶۸۰۰
قیمت توپ‌های ذخیره‌ی سرما (\$)	۱۳۴۸۵/۵
هزینه‌ی خرید و نصب مخزن ذخیره (\$)	۵۳۹۴/۲
قیمت تمام شده‌ی سیستم (\$)	۷۵۶۷۹/۷
هزینه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی روزانه (ریال)	۱۷۰۸۵۳۷/۱۹۳۱



شکل ۱۰: ظرفیت چیلر در حالت ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر

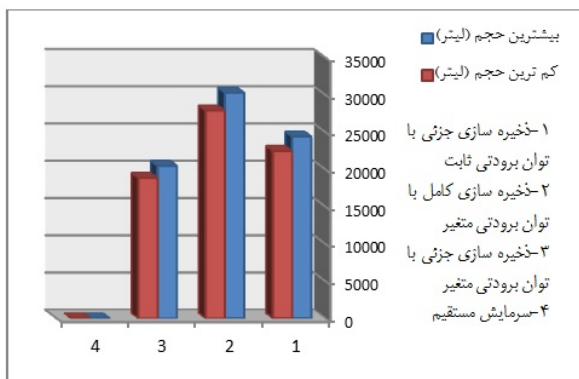
نمودار برق مصرفی سیستم در شبانه روز به صورت شکل ۱۱ می‌باشد.



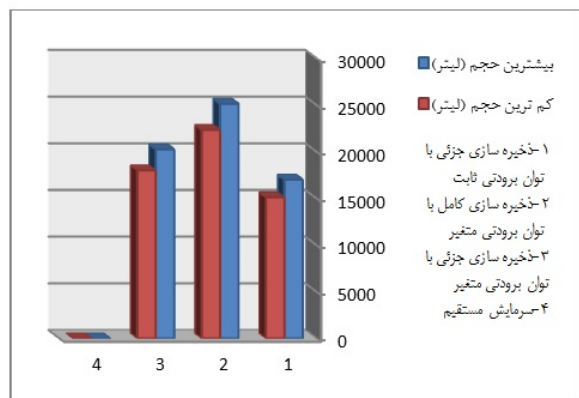
شکل ۱۱: نمودار انرژی الکتریکی مصرفی سیستم بروندی ساختمان در حالت ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر

مشخصات سیستم در استراتژی ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر به صورت جدول ۴ می‌باشد. بررسی نتایج این جدول نشان می‌دهد، در استراتژی ذخیره‌سازی کامل با توان بروندی متغیر مبلغ ۲۶۹۳۵۸/۳۶۹ ریال در هزینه‌ی برق صرفه‌جویی می‌شود ولی هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم حدود ۳۴۴۶/۵ دلار بیشتر از حالت سرمایه‌ی مستقیم است که این مقدار را با توجه به این نکته که در نصف روزهای سال به سرمایه‌ی نیاز است در مدت زمان ۲ سال و پنج ماه جبران می‌شود.

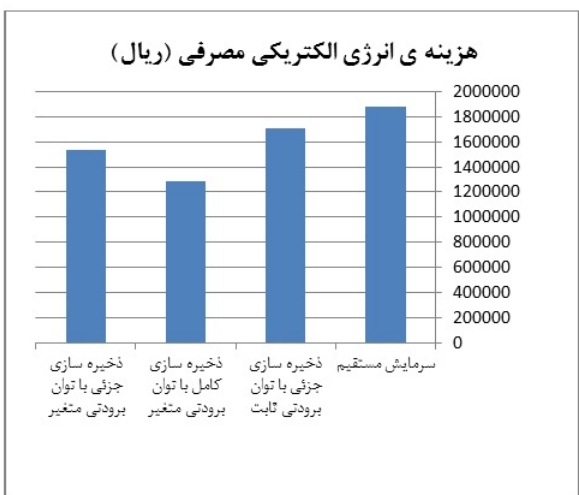
یکی از معایب استفاده از سیستم ذخیره‌ی سرما، فضایی است که باید برای مخزن ذخیره‌ی سرما در نظر گرفته شود. در ادامه مقایسه‌ی حجم مخزن‌های ذخیره آورده شده است. نمودار مقایسه‌ی حجم مخازن در حالت اتمسفریک به صورت شکل ۱۵ می‌باشد. نمودار مقایسه‌ی حجم مخازن در حالت تحت فشار به صورت شکل ۱۶ می‌باشد. نمودار مقایسه‌ی برق مصرفی ساختمان با استراتژی‌های مختلف به صورت شکل ۱۷ می‌باشد.



شکل ۱۵: نمودار مقایسه‌ی حجم مخازن در حالت اتمسفریک

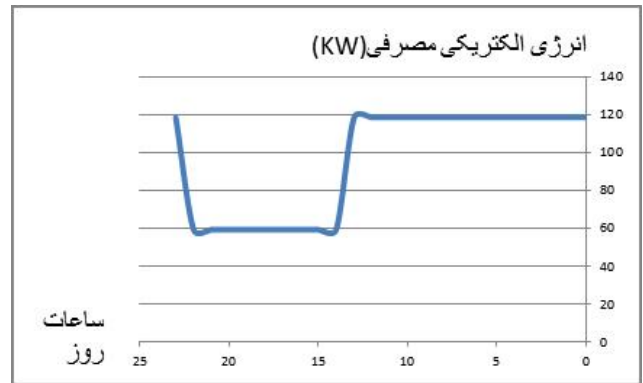


شکل ۱۶: نمودار مقایسه‌ی حجم مخازن در حالت تحت فشار



شکل ۱۷: نمودار مقایسه‌ی هزینه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی برای حالت‌های مختلف

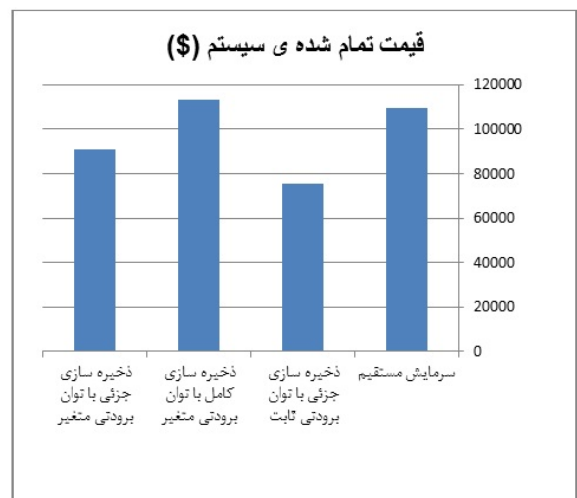
نمودار برق مصرفی سیستم در شبانه روز به صورت شکل ۱۳ می‌باشد. مشخصات سیستم در استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر به صورت جدول ۵ می‌باشد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر مبلغ $154408/6$ ریال در برق مصرفی و حدود $19015/45$ دلار در هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم صرفه‌جویی می‌شود. قیمت تمام شده‌ی سیستم با استراتژی‌های مختلف در نمودار شکل ۱۴ مقایسه شده است.



شکل ۱۳: نمودار انرژی الکتریکی مصرفی سیستم برودتی ساختمان در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر

جدول ۵: جدول مشخصات سیستم برودتی در استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر

پارامتر	مقدار
ظرفیت چیلر واقعی (تن تبرید)	۱۵۴/۹۱
ظرفیت چیلر با ۱۰٪ ضریب اطمینان (تن تبرید)	۱۷۰/۴۰۱
حجم مخزن ذخیره در حالت اتمسفریک (لیتر)	-۲۴۴۲۲/۲۲
حجم مخزن ذخیره در حالت تحت فشار (لیتر)	۲۲۴۹۴/۱۵
قیمت چیلر (\$)	۱۷۹۹۵/۳۲
قیمت توپ‌های ذخیره‌ی سرما (\$)	۶۸۱۶۰/۴
هزینه‌ی خرید و نصب مخزن ذخیره (\$)	۱۶۰۶۷/۲۵
قیمت تمام شده‌ی سیستم (\$)	۶۴۲۶/۹
هزینه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی روزانه (ریال)	۹۰۶۵۴/۵۵
هزینه‌ی انرژی الکتریکی مصرفی روزانه (ریال)	۱۵۳۷۶۷۸/۶۶۹۳



شکل ۱۴: مقایسه‌ی قیمت تمام شده‌ی سیستم با استراتژی‌های مختلف

۵ نتیجه‌گیری

مشکلات سیستم تولید و توزیع برق در ساعات اوج مصرف برق در روزهای گرم تابستان و نیاز به کاهش هزینه‌ی اولیه و هزینه‌های برق مصرفی سیستم‌های برودتی برای خانوارها ایجاب می‌کند که روش‌های رفع این مشکلات مطالعه و تحقیق شود. در این مقاله در راستای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی سرما برای سیستم‌های برودتی ساختمان‌ها که راهکار بسیار مناسبی است پیشنهاد گردید. زیرا، هم برای دولت بدلیل عدم فشار به سیستم‌های تولید و توزیع برق مناسب است و هم برای مصرف‌کنندگان توجیه اقتصادی دارد. سه استراتژی مختلف برای یک ساختمان نمونه در شهر تهران محاسبه شد و نتایج زیر به دست آمد.

- در روش سرمایه‌گذاری مستقیم در ساعاتی از روزهای تابستان اوج باری بر تولید و توزیع برق سراسری کشور تحمیل می‌شود. با توجه به اختلاف قیمت شرایط مختلف برای مصرف‌کنندگان در این روش هزینه زیادی نیز به خانوارها تحمیل می‌شود.
- در استراتژی استفاده از سیستم برودتی در حالت ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی ثابت مبلغ ۱۷۳۳۱۸/۳۴۹۶ ریال در برق مصرفی و حدود ۱۰۹۶۷ دلار در هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم صرفه‌جویی می‌شود.
- در استراتژی ذخیره‌سازی کامل با توان برودتی متغیر مقدار ۶۰۰۳۹۹/۸۰۴۵ ریال در هزینه‌ی برق صرفه‌جویی می‌شود ولی هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم حدود ۳۴۴۶/۵ دلار بیشتر از حالت سرمایه‌گذاری مستقیم است که این مقدار در مدت زمان ۲۳۰ روز جبران می‌شود. با توجه به این نکته که در نصف روزهای سال به سرمایه‌گذاری نیاز است این مدت معادل ۱ سال و دو ماه می‌شود.
- در استراتژی ذخیره‌سازی جزئی با توان برودتی متغیر مبلغ ۳۴۴۱۷۶/۸۷۰۷ ریال در برق مصرفی و حدود ۱۹۰۱۵/۴۵ دلار در هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم صرفه‌جویی می‌شود.

مراجع

- [1] Calmac manufacturing corporation, how the icebank system works. <http://www.calmac.com>.
- [2] Alamrajabi, A.A. and A.R.Akhondpor. Cold storage with direct refrigeration. *ISME98*, 1998 (in Persian).
- [3] Rismanchi, Behzad, Saidur, Rahman, Masjuki, Haji Hassan, and Mahlia, Teuku Meurah Indra. Energetic, economic and environmental benefits of utilizing the ice thermal storage systems for office building applications. *Energy and Buildings*, 50:347-354, 2012.
- [4] Weicheng, Zhang and Siying, Teng. Hvac system energy-saving design for one super-high office building. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2(4):315-321, 2013.
- [5] Mansori, Sh., Maccarizadeh, V., Jabbar, M., and Nouri, M. Specification of the technical characteristics of the ice storage tank on a melting coil from inside to a capacity of 647 kwh. *26 th international power system conference, tehran, iran*, 2011 (in Persian).

- [6] Grozdek, Marino. Load shifting and storage of cooling energy through ice bank or ice slurry systems, doctoral thesis, 2009.
- [7] Grozdek, Marino. Load shifting and storage of cooling energy through ice bank, doctoral thesis, 2009.
- [8] Henderson, G. Ice thermal storage systems. <http://www.cryogel.com>.
- [9] Jafarkazemi, F. and Lashgari, M. Study of the possibility of using a cold storage system in a packed ice package in iran. Tehran, Iran, 2009. The first HVAC international conference (in Persian).
- [10] Electricity tariffs and their general conditions, ministry of power, 2016 (in persian).