اولین کنفرانس بین‌المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع
ایران، تهران، خرداد ۱۳۸۸

مطالعه امکان استفاده از سیستم ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی شده در ایران

فرزاد جعفر کاظمی[۱]، مبین لشکری[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب؛ fjkazemi@parsonline.net
[۲]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب؛ mobinlashkari@yahoo.com

چکیده

تامین سرمایش ساختمان با استفاده از سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی به روش یخ بسته بندی شده در این مقاله بررسی شده است. به طور کلی در سیستم های ذخیره سازی انرژی سرمایشی امکان تولید و ذخیره انرژی سرمایشی در بازه زمانی غیر پیک مصرف برق وجود دارد. انرژی سرمایشی ذخیره شده تامین کننده قسمتی و یا همه ی بار سرمایشی ساختمان در ساعات پیک مصرف برق و اوج بار خنک کنندگی ساختمان می باشد. به دلیل محاسبه مصرف برق بر اساس تعرفه متغیر بکارگیری سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی کاهش هزینه مصرف برق را به دنبال خواهد داشت زیرا هزینه تولید انرژی سرمایشی در ساعات پر باری ده برابر بیشتر از بازه زمانی کم باری یا شب می باشد. علاوه بر آن در ساعات شب بازدهی چیلر به دلیل کاهش دمای محیط بیشتر می شود. از میان روش های مختلف ذخیره سازی انرژی سرمایشی، سیستم یخ بسته بندی شده با بهره گیری از گرمای نهان ذوب یخ توان ذخیره سازی بیشتری را در فضای یکسان نسبت به سایر سیستم های ذخیره سازی دارا ست. میزان شارژ و تخلیه شارژ مخازن ذخیره سازی انرژی سرمایشی به منحنی بار سرمایشی ساختمان در طول شبانه روز یا بازه زمانی هفتگی بستگی دارد. هرچه نسبت اوج بار سرمایشی به کل بار سرمایشی ساختمان در یک دوره بیشتر باشد، بکارگیری از سیستم ذخیره سازی توجیه اقتصادی بهتری دارد.

کلمات کلیدی: ذخیره سازی سرما، پیک مصرف برق، یخ بسته بندی شده، سرمایش ساختمان.

مقدمه

در سال های گذشته، گرم شدن زمین از یک سو و تمایل مردم در استفاده از سیستم های سرمایشی مستقیم از سوی دیگر، افزایش چشمگیر پیک مصرف برق ایران در فصل تابستان را به دنبال داشته است. پیک مصرف برق در سال ۱۳۸۴، ۳۰۶۶۹ مگاوات بوده که نسبت به سال قبل حدود ۱۱/۴ درصد افزایش داشته است. با توجه به نیاز کشور به ساخت بیش از یک میلیون واحد مسکونی در هر سال و گسترش علاقه مردم به استفاده از سیستم های تهویه مطبوع مدرن حتی در مناطق سردسیر و معتدل، کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم های خنک کننده حداقل در ساعات اوج مصرف ضروری به نظر می رسد. بکار گیری سیستم های تهویه مطبوع مستقیم معمولا به دو دلیل افزایش بار سرمایشی ساختمان یا احداث ساختمان های جدید می باشد که در هر دو مورد می توان از سیستم ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی بهره برد به این گونه که علاوه بر هزینه سرمایه گذاری تقریبا یکسان با روش تهویه مستقیم در مصارف خانگی کاهش مصرف برق را در ساعات اوج مصرف به دنبال خواهد داشت. در برخی مصارف تجاری به دلیل اختلاف زیاد بین بار سرمایشی مورد نیاز در طول روز و نیمه شب، هزینه سرمایه گذاری اولیه برای احداث سیستم ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی شده کمتر از روش تهویه مستقیم است.

قیمت ناچیز انرژی الکتریکی در ایران از زمان ارائه تا کنون موجب شد که طراحان و تولید کنندگان تجهیزات سرما زا توجه کمتری به بهره وری انرژی در این زمینه داشته باشند. اما با توجه به اهداف پیش بینی شده در برنامه پنجم توسعه مبنی بر عرضه انرژی الکتریکی بر پایه قیمت واقعی و حذف یارانه ها، تلاش برای کاهش هزینه تولید سرمایش ساختمان ها آغاز شده است. در این راستا وزارت نیرو با محاسبه تعرفه برق مصرفی بر پایه زمان مصرف، شتاب بیشتری به استفاده از روش های بهره وری از انرژی الکتریکی بخشیده است.

بنا بر گزارش وزارت نیرو در سال ۱۳۸۴، ۳۲/۱ درصد از برق مصرفی کل کشور در بخش خانگی مصرف شد که از این میزان سیستم های خنک کنندگی بیشترین مصرف را به ویژه در ساعت پیک مصرف (ساعت ۱۵) به خود اختصاص داده اند. همچنین بخش تجاری در سال ۱۳۸۴ با افزایش مصرف ۶۷۹/۳ میلیون کیلووات ساعت نسبت به سال گذشته بالغ بر ۸۵۴۲ میلیون کیلووات ساعت برق را مصرف کرده است که با نرخ رشد ۸/۶ درصد نسبت به سال ۱۳۸۳ در حدود ۶/۳ درصد از کل برق مصرفی کشور را به خود اختصاص داده است. در جدول (۱) میزان مصرف برق بخش های مختلف را طی سال های ۸۴-۱۳۷۶ ارائه شده است.

از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۴ متوسط نرخ رشد سالانه مصرف برق در بخش خانگی در حدود ۶.۶ درصد بوده است که علاوه بر افزایش تمایل مردم به استفاده از وسایل رفاهی الکتریکی، گرم شدن هوا و گسترش بهره مندی از تجهیزات تهویه مطبوع از مهمترین دلایل این رشد مصرف بوده اند. همانطور که در جدول (۱) اشاره شده، در سال ۱۳۸۴ مصرف برق در بخش خانگی به ۴۴۱۰۸ میلیون کیلووات بالغ گردید که دارای نرخ رشد ۸.۷ درصدی نسبت به سال قبل از آن می باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱: مصرف برق بخش های مختلف تامین شده توسط وزارت نیرو طی سال های ۸۴-۱۳۷۶ (میلیون کیلووات ساعت)

سال	خانگی	عمومی	تجاری	صنعتی	سایر مصارف	جمع
۱۳۷۶	۲۶۵۲۳	۶۷۲۷	۸۱۶	۲۳۶۶۱	۸۲۸۷	۷۳۳۵
۱۳۷	۲۸۶۸۶	۷۰۷۷	۸۴۸	۲۴۱۴	۹۲۵۹	۷۷۶۴۶
۱۳۷	۲۹۷۵۴	۱۰۶۲	۵۵۶	۲۶۴۹	۱۲۲۲۰	۸۴۶۵۶
۱۳۷	۳۱۲۶۶	۱۱۲۷	۵۹۹	۲۸۹۲	۱۲۹۱۴	۹۰۳۶۶
۱۳۸	۳۲۸۹۱	۱۱۹۵	۶۳۹	۳۰۷۲	۱۵۲۱۴	۹۷۱۷
۱۳۸	۳۴۹۴۶	۱۲۶۳	۶۹۲	۳۳۴۵	۱۷۱۱۹	۱۰۵۰
۱۳۸	۳۷۹۶۷	۱۳۷۱	۷۴۶	۳۶۹۳	۱۸۵۴۴	۱۱۴۹
۱۳۸	۴۰۵۶۳	۱۵۰۲	۷۸۶	۴۰۲۴	۲۰۷۶۶	۱۲۴۴
۱۳۸	۴۴۱۰۸	۱۶۳۹	۸۵۴	۴۲۹۵	۲۰۸۸۶	۱۳۲۸

در جدول (۲) آمار مقایسه ای بین نماگر های رشد مصرف برق از سال ۱۳۷۶ تا ۸۴ ارائه شده است. ملاحظه می شود که به موازات افزایش تولید سرانه در هر سال، تعداد مشترک ها و متوسط مصرف سالانه هر مشترک رشد بالایی داشته است.

جدول ۲: مقایسه نماگر های رشد صنعت برق کشور طی سال های ۸۴-۱۳۷۶

سال	حداکثر بار همزمان تولید شده (مگا وات)	تولید انرژی سرانه (کیلووات ساعت بر نفر)	تعداد مشترک (هزار)	متوسط مصرف سالانه هر مشترک (کیلووات ساعت)
۱۳۷۶	۱۷۳۱۵	۱۵۹۹	۱۳۵۵۰	۵۴۱۴
۱۳۷۷	۱۸۰۸۸	۱۶۶۸	۱۴۱۲۷	۵۴۹۶
۱۳۷۸	۱۹۲۵۵	۱۷۸۸	۱۴۸۷۵	۵۶۹۱
۱۳۷۹	۲۰۵۸۱	۱۹۰۶	۱۵۵۷۹	۵۸۰۰
۱۳۸۰	۲۱۸۳۸	۲۰۱۵	۱۶۳۴۵	۵۹۴۵
۱۳۸۱	۲۳۴۹۴	۲۱۰۳	۱۷۱۵۳	۶۱۲۶
۱۳۸۲	۲۶۲۱۶	۲۲۳۴	۱۷۹۷۷	۶۳۷۶
۱۳۸۳	۲۹۲۶۷	۲۴۷۴	۱۸۸۳۶	۶۶۵۷
۱۳۸۴	۳۲۳۰۲	۲۶۰۱	۱۹۶۹۰	۶۸۸۳

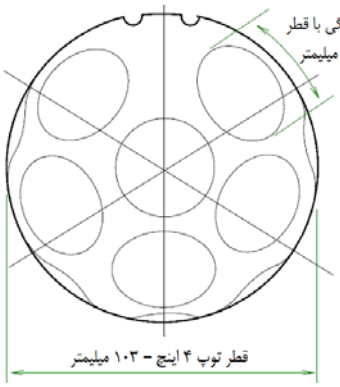
تاریخچه تکنولوژی ذخیره سازی یخ بسته بندی شده

ذخیره سازی سرما عبارت است از تولید و ذخیره سرما در یک بازه زمانی و استفاده از آن در ساعات اوج مصرف برق یا اوج نیاز به بار سرمایشی. ذخیره سرما معمولا در ساعات شب که بار سرمایشی و تعرفه مصرف برق کم می باشند انجام شده و در بازه زمانی که با پیک مصرف برق و بار سرمایشی مواجه هستیم بکار گرفته می شود. معمولا گرمای نهان آب (۴.۱۸ kj/kg.K) یا گرمای نهان ذوب یخ (۳۳۴ kj/kg) ، محلی برای ذخیره انرژی سرمایشی می باشند.

کریاژل[۱] یکی از قدیمی ترین و بزرگترین شرکت های تحقیقاتی و عملیاتی در زمینه ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی شده می باشد که تا سال ۲۰۰۴ میلادی در مجموع بیش از ۲۰۰ هزار تن ساعت سیستم ذخیره سازی را طراحی، نصب و بهره برداری نموده است. کریاژل از طریق یک شرکت تحقیقاتی و عملیاتی در کشور مالزی[۲] تکنولوژی خود را به کشورهای آسیایی عرضه می کند. [۴]

مبرد استفاده شده در سیستم های یخ بسته بندی شده معمولا ضد یخ گلیکول می باشد که از روی توپ های حاوی آب یا یخ عبور کرده و انتقال حرارت را در مراحل شارژ یا تخلیه انجام می دهد. به هنگام نیاز به بار سرمایشی در سیستم، گلیکول گرم از روی توپ های شامل یخ و آب سرد عبور کرده و انتقال حرارت بین توپ ها و مبرد انجام می شود. سپس گلیکول سرد برای تامین نیاز سرمایش سیستم از مخزن توپ ها خارج می شود.

توپ های یخی نگهدارنده آب و یخ از پلاستیک پلیمری با کیفیت بالا ساخته می شوند. قطر توپ ۱۰۳ میلیمتر است و دارای ۱۶ عدد فرورفتگی در سطح خود می باشد (شکل ۱) که به آب درون توپ به هنگام یخ زدگی اجازه افزایش حجم می دهد. توپ های ساخته شده در کارخانه پرآب می شوند و قابلیت انتقال حرارت آن ها توسط آزمایشگاه های معتبر سنجیده می شود.



شکل ۱: ابعاد توپ یخی

توپ ها درون تانک ذخیره قرار داده می شوند و انتقال حرارت بوسیله عبور گلیکول از روی توپ ها انجام می شود. در زمان شارژ(شب) آب درون توپ ها یخ می زند و در روز بعد به هنگام تخلیه شارژ انرژی سرمایشی از توپ ها به مبرد گلیکول منتقل شده و از تانک ذخیره خارج می شود. هیچ گونه لوله مبدل حرارتی، فن یا دیگر تجهیزات متحرک در ساختار تانک نقشی ندارند. بهره برداری از تانک ذخیره فقط شامل نصب تانک استاندارد، اجرای لوله کشی مربوط به آن و سپس پر کردن تانک از توپ های یخی می باشد. طراحی و

[۱] Cryogel
[۲] DTSi

Archive of SID
www.SID.ir

نصب سیستم های ذخیره سازی بسیار ساده تر از سیستم های یخ روی کویل می باشد زیرا نیاز کمتری به فضا و همچنین لوله کشی دارند.

انعطاف پذیری در طراحی و اجرای تانک ذخیره

توپ های یخی به گونه ای طراحی شده اند که به راحتی می توانند گوشه های تانک ذخیره با هر نوع شکل هندسی را پر کنند بدون اینکه توان انتقال حرارت تانک تغییر چشمگیری بکند. مزایای تانک ذخیره در سیستم های یخ بسته بندی شده را می توان به صورت زیر عنوان کرد،

- امکان استفاده از تانک های موجود در سازه ساختمانی.
- امکان بکارگیری تانک های فلزی برای سیستم تحت فشار.
- توانایی بهره برداری از مخزن بتنی و فلزی در سیستم های با فشار اتمسفر.
- امکان استفاده از مخازن با شکل مکعب مستطیل یا استوانه ای.
- توانایی احداث تانک در زیر زمین یا زیر جاده که از لحاظ هزینه های مکان یابی برای تانک نسبت به دیگر روش ها قابل توجه می باشد.

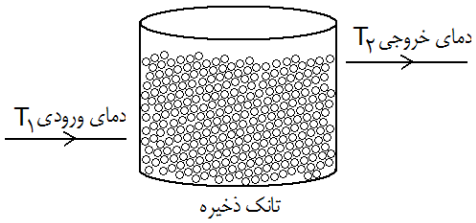
یکی از موارد قابل توجه در احداث سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی برآورد هزینه فضای مورد نیاز برای استقرار تانک می باشد. در تانک های تحت فشار حجم تانک مورد نیاز بین ۲.۰ تا ۲.۲۵ فوت مکعب (۵۶ تا ۶۳ لیتر) بر هر تن ساعت و در تانک های اتمفسریک حجم تانک بین ۲.۵ تا ۲.۷ فوت مکعب (۷۰ تا ۷۶ لیتر) بر هر تن ساعت می باشند. کوچک شدن اندازه تانک علاوه بر کاهش هزینه ساخت و جانمایی تانک می تواند هزینه های لوله کشی، روشنایی، برق کشی و دیگر تجهیزات را نیز تعدیل نماید.

طراحی سیستم بر مبنای اختلاف دمای میانگین لگاریتمی[۳]

معیار اختلاف دمای میانگین لگاریتمی این امکان را به طراح می دهد که شدت توان شارژ و تخلیه بار سرمایشی سیستم را محاسبه کند. اختلاف دمای میانگین لگاریتمی سیستم بر پایه اختلاف دمای مبرد ورودی به تانک و دمای مبرد خروجی از تانک بدست می آید که در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$LMTD = \frac{|T_1| - |T_2|}{\ln |T_1| / |T_2|} \qquad (۱)$$

در حالت تخلیه شارژ هرچه دمای مورد نیاز بار سیستم پایین تر باشد، مقدار اختلاف دمای میانگین لگاریتمی نیز کمتر شده و در نتیجه توان لحظه ای تانک ذخیره برای تامین انرژی سرمایشی نیز کمتر خواهد شد. برای جبران این مسئله باید ظرفیت تانک و تعداد توپ های یخی درون آن افزایش یابد.



شکل ۲: دمای ورودی و خروجی مبرد برای محاسبه LMTD

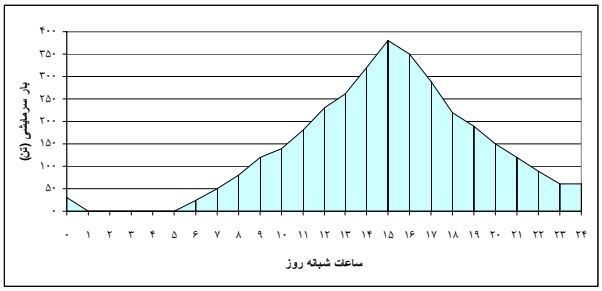
بیانی دیگر از تاثیر اختلاف دمای میانگین لگاریتمی را می توان در مرحله شارژ کردن تانک ذخیره یافت. هرچه زمان کمتری برای شارژ تانک در نظر گرفته شده باشد، باید مبرد ورودی به تانک نیز سرد تر بوده و این مسئله مقدار اختلاف دمای میانگین لگاریتمی را کاهش داده و انرژی بیشتری را برای جبران این نیاز می طلبد.

شدت توان سرمایشی که باید توسط تانک ذخیره فراهم شود مقدار انرژی تبریدی بر اساس واحد تن ساعت است که باید برای تامین بار سیستم به مدار خنک کنندگی ساختمان اضافه شود. توان اسمی تانک ذخیره کل میزان بار تبریدی است که سیستم در یک دوره تخلیه شارژ در دمای مورد نظر نیاز دارد. توان اسمی در همه ی سیستم های ذخیره سازی سرما بزرگ تر از شدت توان سرمایشی تانک ذخیره در بازه زمانی معین است. به بیان ساده تر کل یخ موجود در تانک در بازه زمانی مشخصی می تواند ذوب شده و انرژی سرمایشی آزاد شده را در اختیار سیستم قرار دهد. اگر سیستم ذخیره سازی به گونه ای طراحی شود که ٪۱۰۰ توان سرمایشی تانک ذخیره برای تامین بار سرمایشی سیستم لازم باشد، به جرات می توان گفت که این سیستم به درستی طراحی نشده است. زیرا در عمل نمی تواند بار سرمایشی سیستم را تامین کند.

طراحی برای یک ساختمان نمونه

در این بخش ذخیره سازی انرژی سرمایشی سیستم خنک کنندگی یک ساختمان نمونه با استفاده از روش یخ بسته بندی شده طراحی شده است. از دید استراتژی بهره برداری نیز استراتژی ذخیره سازی جزئی با توان برودتی ثابت و متغیر و همچنین استراتژی ذخیره کامل در نظر گرفته شده اند. سطح زیر منحنی در شکل (۳) را کل بار سرمایشی ساختمان می نامیم که از رابطه زیر بدست می آید.

$$A = \int_1^{24} Ldh \qquad (۲)$$



شکل ۳ : : بار برودتی یک ساختمان نمونه در یک شبانه روز

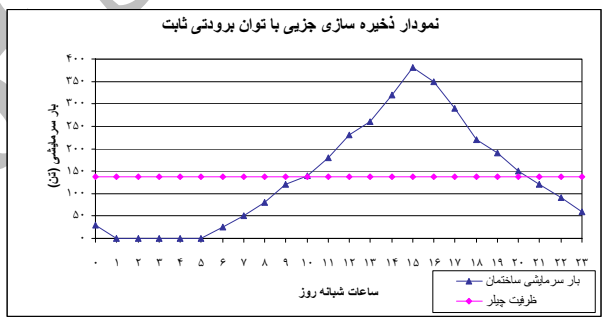
[۳] Logarithmic Mean Temperature Difference (LMTD)

Archive of SID
www.SID.ir

در این مثال A=۳۲۸۵ تن ساعت می باشد. محاسبه هزینه برق مصرفی بر طبق تعرفه اماکن تجاری شهر تهران و در ماههای خرداد و تیر سال ۱۳۸۶ می باشد.

استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت

با تقسیم کل بار سرمایشی بر ۲۴ ساعت توان سرمایشی ۱۳۷ تن برای چیلر بدست می آید. با در نظر گرفتن ۱۰ درصد ضریب اطمینان، چیلر با بار سرمایشی ۱۵۱ تن انتخاب می شود. ضریب اطمینان به این دلیل لحاظ می شود که معمولا ظرفیت سرمایشی سیستم خنک کننده با گذشت عمر آن کاهش یافته و از شرایط ایده آل خارج می شود. با این روش چیلر با حدود ۹۰ درصد اسمی به صورت مداوم در سیکل سرمایشی ساختمان شرکت می کند. در ۱۳ ساعت از شبانه روز قسمتی از توان سرمایشی چیلر صرف ذخیره سازی می شود و در ۱۱ ساعت دیگر بطور مستقیم و به کمک سیستم ذخیره سازی بار تبریدی ساختمان را تامین خواهد کرد. در این سیکل ۱۲۰۵ تن در هر روز انرژی سرمایشی ذخیره و مصرف می شود. نمودار تامین بار سرمایشی ساختمان با استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ : تامین بار برودتی ساختمان نمونه در یک شبانه روز به روش ذخیره سازی جزیی و بار برودتی ثابت

محاسبه هزینه احداث سیستم در استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت

قیمت چیلر ۱۵۱ تنی یخ ساز انتخاب شده در این سیستم حدود ۴۰۰ دلار در هر تن تبرید می باشد. در این مثال پیک بار سرمایشی ۳۸۰ تن می باشد که در نهایت با بکار گیری سیستم ذخیره سازی چیلر با ظرفیت کارکرد ۱۳۷ تن تبرید انتخاب شد. بنابراین هزینه سیستم ذخیره سازی برای ۲۴۳ تن تبرید (۳۸۰-۱۳۷=۲۴۳) محاسبه می شود.

در صورت بکارگیری سرمایش مستقیم و بدون ذخیره سازی، چیلر مورد استفاده فقط آب را تا دمای۴+ درجه سانتیگراد خنک می کند و توانایی تولید یخ را ندارد در نتیجه قیمت آن به ۲۰۰ تا ۳۰۰ دلار در هر تن تبرید کاهش می یابد. همچنین چیلر باید توانایی تامین پیک بار سرمایشی یعنی ۳۸۰ تن بر ساعت در ساعت ۱۵ را داشته باشد. در این بررسی بر مبنای قیمت ۲۵۰ دلار بر هر تن، هزینه تامین چیلر ۴۱۸ تنی (۱۰ درصد افزایش ظرفیت برای ضریب اطمینان) در حالت سرمایش مستقیم و بدون ذخیره سازی ۱۰۴۵۰۰ دلار در نظر گرفته می شود. ملاحظه می شود که هزینه سرمایه گذاری اولیه برای اجرای سیستم ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی شده و استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان ثابت بیش از ۲۷۰۰۰ دلار کمتر از سیستم های سرمایش مستقیم است. یکی از دلایل این کاهش استفاده از چیلر یخ ساز با ظرفیت بسیار کمتر است. همانطور که ذکر شد به جای چیلر آب سرد کن ۴۱۸ تنی، چیلر یخ ساز ۱۵۱ تنی بکار رفته است.

جدول ۳ : محاسبه هزینه احداث سیستم ذخیره سازی سرما برای ساختمان نمونه به روش ذخیره سازی جزیی و بار برودتی ثابت [۴]

تجهیزات	قیمت (دلار بر تن تبرید)	قیمت نهایی (دلار)
چیلر ۱۵۱ تنی	۴۰۰	۶۰۴۰۰
توپ یخی برای تامین (۲۴۳=۱۳۷-۳۸۰) تن تبرید	۵۰	۱۲۱۵۰
احداث تانک برای تامین (۲۴۳=۱۳۷-۳۸۰) تن تبرید	۲۰	۴۸۶۰
جمع کل		۷۷۴۱۰

محاسبه کاهش هزینه برق مصرفی در استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت

در حالت بهره برداری از سیستم ذخیره سازی سرما برای ساختمان نمونه چیلر بطور دائم با توان ۱۳۷ تن ساعت کار می کند. توان مصرفی چیلر های یخ ساز با برودت متوسط بین ۰.۸۵ تا ۱.۲ کیلووات بر تن می باشد. در این بررسی با استفاده از نرم افزار کول پک[۴] توان مصرفی چیلر برای تامین بار سرمایشی ۱۳۷ تن ساعت بدست می آید. ویرایش ۱.۴۶ نرم افزار کول پک را می توان به صورت رایگان از طریق مرجع [۷] دانلود کرد.

در قسمت تحلیل سیکل سرمایش این نرم افزار سیکل های یک و دو مرحله ای و ترکیبی ارائه شده اند اما در این بررسی سیکل یک مرحله ای یا به نوعی ساده ترین نوع آن انتخاب شده تا از نتایج پایه ای آن برای محاسبه توان مصرفی سیستم خنک کننده استفاده شود. در شروع کار باید اطلاعات مختلفی را وارد نرم افزار کرد. با توجه به شرایط محدود تحلیلی این بررسی، تعدادی از فاکتور های محاسبه مانند ضریب کاهش فشار در لوله ها، فاکتور اتلاف گرمای کمپرسور و بازدهی آیزنتروپیک بر اساس مقادیر میانگین ثبت شده نرم افزار انتخاب می شوند. دمای هوای خنک کننده ی کندانسور با توجه به دمای هوای خشک مرکز تهران در فصل تابستان $35\ ^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. نوع مبرد مورد استفاده نیز در نتایج نهایی تغییر چندانی ایجاد نمی کند و به نوعی در مراحل خرید و نصب سیستم و ملاحظات زیست محیطی پروژه های مختلف قابل تغییر است. اطلاعات اولیه مطابق جدول (۴) وارد نرم افزار می شوند.

---

[۴] Coolpack

Archive of SID

www.SID.ir

با توجه به اطلاعات داده شده در جدول (۴)، توان مصرفی چیلر در حالت ذخیره سازی جزیی با بار برودتی ثابت برای ساختمان نمونه ۰/۹۸ کیلووات بر تن بدست می آید. به بیان دقیق تر توان مصرفی کمپرسور با استفاده از نرم افزار ۱۳۵.۳KW بدست می آید که با تقسیم آن بر ظرفیت خنک کنندگی (۱۳۷ تن) ، انرژی الکتریکی مصرفی چیلر محاسبه می شود.

جدول ۴: ورودی اطلاعات به نرم افزار کول پک برای محاسبه توان مصرفی چیلر در سیستم ذخیره سازی روش ذخیره سازی جزیی و بار برودتی ثابت

نوع مبرد	R407C
دمای مبرد خروجی از اواپراتور T_E	$-۶°C$
بازده آیزنتروپیک η_{IS}	۰/۷
فاکتور اتلاف گرما از کمپرسور f_Q	۱۰٪
ظرفیت سرمایش Q_E	۴۸۱KW (۱۳۷tons)
دمای سیال خنک کننده کندانسور T_C	۳۵

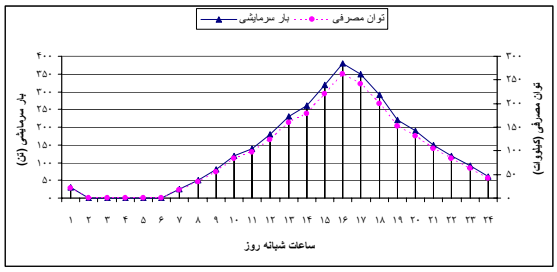
در حالت سرمایش مستقیم انرژی مصرفی چیلر در ساعات شبانه روز متفاوت است. برق مصرفی چیلر های آب خنک کن بین ۰/۶ تا ۰/۷ کیلووات بر تن تبرید می باشد که در این حالت نیز با بهره گیری از نرم افزار کول پک مقدار دقیق توان مصرفی کمپرسور بدست می آید. مانند روش قبل ابتدا اطلاعات اولیه را طبق جدول (۵) وارد نرم افزار می شوند.

جدول ۵: ورودی اطلاعات به نرم افزار کول پک برای محاسبه توان مصرفی چیلر در روش سرمایش مستقیم

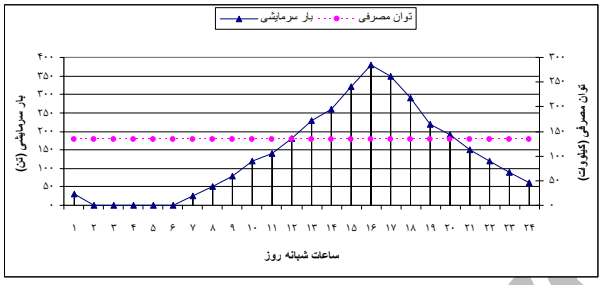
نوع مبرد	R407C
دمای مبرد خروجی از اواپراتور T_E	$۴°C$
بازده آیزنتروپیک η_{IS}	۰/۷
فاکتور اتلاف گرما از کمپرسور f_Q	۱۰٪
ظرفیت سرمایش Q_E	۱۳۳۶KW (۳۸۰tons)
دمای سیال خنک کننده کندانسور T_C	۳۵

در سرمایش مستقیم توان خنک کنندگی چیلر مانند روش ذخیره سازی ثابت نبوده و در ساعات مختلف شبانه روز با توجه به نیاز سرمایشی ساختمان تغییر می کند. بر پایه قوانین توان مصرفی سیستم سرمایش مستقیم در ظرفیت های خنک کنندگی مختلف متفاوت است اما در این مثال توان سرمایش از ۲۰ تا ۳۸۰ تن ساعت وارد نرم افزار شده و نتایج مصرف انرژی الکتریکی را نزدیک به ۰/۶۹ کیلووات انرژی الکتریکی را برای تولید هر تن برآورد می کند. در نتیجه توان مصرفی سیستم سرمایش مستقیم در طول شبانه روز مقدار ثابت ۰/۶۹ کیلووات بر تن در نظر گرفته می شود. بر این اساس مصرف انرژی الکتریکی سیستم سرمایش مستقیم و سیستم ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت در ساعات مختلف شبانه روز به ترتیب در اشکال (۵) و (۶) ارائه شده اند.

ملاحظه می شود که توان مصرفی سیستم در حالت تبرید مستقیم (شکل ۵) با افزایش بار سرمایشی ساختمان بیشتر شده و در ساعت ۱۵ به بیش از ۲۶۰ کیلووات ساعت رسیده است. این درحالی است که توان مصرفی با استفاده از سیستم ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت (شکل ۶) به میزان ثابت ۱۳۴ کیلووات ساعت در کل شبانه روز می باشد.



شکل ۵ : توان مصرفی چیلر در حالت تبرید مستقیم قبل از احداث سیستم ذخیره سازی



شکل ۶ : توان مصرفی چیلر در حالت ذخیره سازی انرژی سرمایشی با استراتژی ذخیره جزیی با توان برودتی ثابت

مصرف برق در ساعت ۱۵ با استفاده از روش ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت ٪۴۹ کاهش یافته است.

جدول ۶ : زمان بندی مصرف برق در سال ۸۶

ماه	کم باری (ساعات شبانه روز)	میان باری (ساعات شبانه روز)	پر باری (ساعات شبانه روز)
فروردین، اردیبهشت، مرداد و شهریور	۰۰ تا ۰۸	۰۸ تا ۱۸ و ۲۲ تا ۲۴	۱۸ تا ۲۲
خرداد و تیر	۰۰ تا ۰۸	۰۸ تا ۱۹ و ۲۳ تا ۲۴	۱۹ تا ۲۳
شش ماهه دوم سال	۰۰ تا ۰۵ و ۲۱ تا ۲۴	۰۵ تا ۱۷	۱۷ تا ۲۱

تعرفه مصرف برق در سال ۱۳۸۶ برای کلیه نواحی استان تهران به صورت تعرفه متغیر اعلام شده است [۲]. همانطور که در جداول (۶) و (۷) با جزییات ارائه شده، تعرفه مصرف انرژی الکتریکی برای مصرف آزاد در ساعات شبانه روز و ماه های مختلف سال به شکل

Archive of SID

www.SID.ir

متغیر محاسبه می شود. با ارجاع به این اطلاعات هزینه ی برق مصرفی ساختمان نمونه محاسبه می شود.

جدول ۷: بهای انرژی الکتریکی برای مصارف آزاد با توان بیش از ۳۰ کیلووات بر گرفته از تعرفه مصرف برق شهر تهران در ماههای خرداد و تیر

دوره مصرف	کم باری	میان باری	پر باری
بهای انرژی(کیلووات بر ریال)	۱۶۱.۶۹	۳۲۳.۵	۶۴۶.۸

محاسبه مصرف انرژی الکتریکی چیلر در شرایط عادی و بدون بکارگیری از سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی نشان می دهد که برای سرمایش ساختمان در ماههای خرداد و تیر روزانه ۸۴۴۲۶۰ ریال هزینه خواهد شد.

در صورت استفاده از سیستم ذخیره سازی جزیی با توان ثابت چیلر بطور مداوم با توان ۱۳۷ کیلووات کار می کند. بهای مصرف برق آن در ماههای خرداد و تیر روزانه ۱۰۴۱۳۱۴ ریال می باشد. ملاحظه می شود که بکار گیری استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت برای این ساختمان هزینه برق مصرفی را روزانه بیش از ۱۹۷۰۰۰ ریال افزایش می دهد.

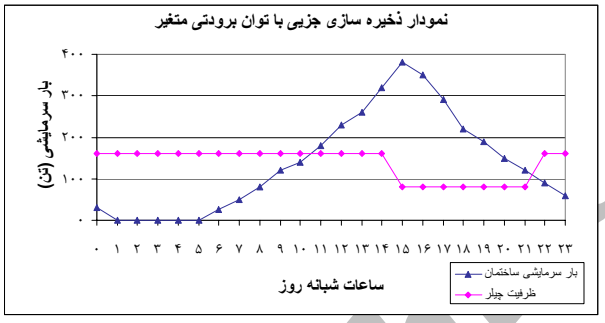
استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی متغیر

در این روش طراح با توجه به نمودار بار سرمایشی ساختمان محاسبه می کند که چه درصدی از توان برودتی چیلر کاهش یابد. همچنین با توجه به نزدیکی ساعات پیک مصرف برق و اوج گرمای هوا این کاهش توان در چه ساعاتی از شبانه روز انجام شود. استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی متغیر دارای ویژگی های هر دو روش ذخیره سازی جزیی با توان ثابت و روش ذخیره کامل می باشد. به بیان دیگر هرچه درصد کاهش توان برودتی چیلر کمتر باشد، ظرفیت چیلر در هر دو حالت تغییر یافته به هم نزدیک تر شده، و نتایج محاسبات به استراتژی جزیی با توان برودتی ثابت شبیه تر می باشد و هرچه کاهش توان چیلر بیشتر باشد، ظرفیت خنک کنندگی در یک حالت نزدیک تر به صفر شده، و محاسبات به استراتژی ذخیره کامل که در بخش بعد ارائه شده تشابه بیشتری خواهد داشت. در استراتژی جزیی با توان برودتی ثابت طراح قادر به تغییر ظرفیت چیلر نمی باشد و محاسبات فقط به یک جواب ختم می شوند. اما در استراتژی توان برودتی متغیر طراح می تواند میزان محدودیت استفاده از چیلر را با توجه به شرایط طراحی تغییر دهد. در این مورد علاوه بر قیمت و پیک مصرف برق در بازه زمانی متفاوت، تعداد و نحوه کارکرد چیلر یا چیلر ها نیز حائز اهمیت است. به عنوان مثال اگر از ۲ عدد چیلر در سیستم استفاده می شود یکی از بهترین گزینه ها بکار گیری از یک چیلر در زمان کاهش توان برودتی و استفاده از هر دو در دیگر ساعات می باشد. اینکه در چه ساعاتی و به چه میزانی باید ظرفیت چیلر کاهش یابد، در هزینه های برق مصرفی و سرمایه گذاری تاثیر می گذارد. اگرچه بازه پیک مصرف برق و محدوده پربار تعرفه برای طراح مشخص است، انتخاب بهترین گزینه معمولا به کمک سعی و خطا بدست می آید.

در این نمونه با در نظر گرفتن همه ی شرایط اشاره شده برنامه کاری چیلر بدین صورت طراحی شد که از ساعت ۱۵ تا ۲۲ به مدت ۷ ساعت با ٪۵۰ درصد از ظرفیت خود کار می کند. بار ساختمان نمونه ۳۲۸۵ تن در یک شبانه روز می باشد. اگر ظرفیت چیلر را در حالت جزیی x بنامیم و با توجه به ٪۵۰ کاهش ظرفیت در ساعات اشاره شده رابطه زیر بدست می آید.

$$[(24-7)\times x]+[7\times(0.5x)]=3285 \qquad (۳)$$

در نتیجه ظرفیت چیلر در حالت جزیی x=160 تن و در ۷ ساعت به ۸۰ تن کاهش می یابد. با در نظر گرفتن ۱۰ درصد ضریب اطمینان، چیلر با بار سرمایشی ۱۷۷ تن انتخاب می شود. با این روش چیلر ها با ظرفیت ۱۶۰ تن به مدت ۱۷ ساعت از شبانه روز و در ۷ ساعت دیگر با ظرفیت ۸۰ تن در سیکل سرمایشی ساختمان شرکت می کنند. در ۱۴ ساعت از شبانه روز قسمتی از توان سرمایشی چیلر صرف ذخیره سازی می شود و در ۱۰ ساعت دیگر بطور مستقیم و به کمک سیستم ذخیره سازی بار تبریدی ساختمان را تامین خواهد کرد. در این سیکل ۱۵۲۸ تن در هر روز انرژی سرمایشی ذخیره و مصرف می شود. نمودار تامین بار سرمایشی ساختمان را با این روش در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷ : تامین بار برودتی ساختمان نمونه در یک شبانه روز به روش ذخیره سازی جزیی و بار برودتی متغیر

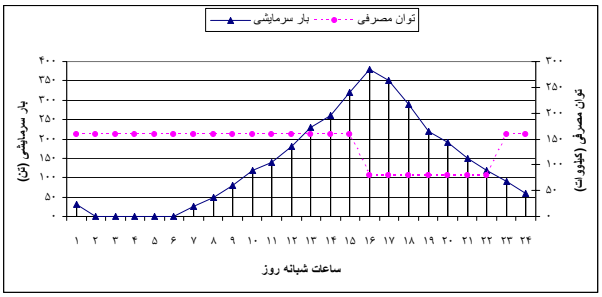
محاسبه هزینه احداث و کاهش هزینه برق مصرفی در استراتژی ذخیره سازی جزیی یا توان برودتی متغیر نیز همانند روش ذخیره سازی جزیی با توان برودتی ثابت انجام می شود. محاسبات برای ساختمان نمونه نشان می دهد که هزینه سرمایه گذاری اولیه برای اجرای سیستم ذخیره سازی سرما به روش یخ بسته بندی شده و استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان متغیر بیش از ۱۲۷۰۰ دلار کمتر از سیستم های سرمایش مستقیم است. یکی از دلایل این کاهش هزینه استفاده از چیلر یخ ساز با ظرفیت بسیار کمتر است. همانطور که ذکر شده به جای چیلر آب سرد کن ۴۱۸ تنی، چیلر یخ ساز ۱۷۷ تنی بکار رفته است.

با بهره گیری از نرم افزار کول پک توان مصرفی سیستم در حالت ذخیره سازی جزیی با بار برودتی متغیر در حالت کارکرد چیلر با ظرفیت های ۱۶۰ و ۸۰ تن، به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۹۸ کیلووات بر تن بدست می آید که ضریب مصرف بالاتر یعنی ۰/۹۹ بکار گرفته می شود. در شکل (۸) توان مصرفی سیستم ذخیره سازی جزیی با توان

Archive of SID

www.SID.ir

برودتی متغیر در ساعات مختلف شبانه روز و در مقایسه با بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان نشان داده شده است. در مقایسه با حالت سرمایش مستقیم (شکل ۵) ، مصرف برق در استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی متغیر در ساعات اوج گرما و پیک مصرف برق یعنی ساعات ۱۵ تا ۲۲ بسیار کمتر می باشد.



شکل ۸ : توان مصرفی چیلر در حالت ذخیره سازی انرژی سرمایشی با استراتژی ذخیره جزیی با توان برودتی متغیر

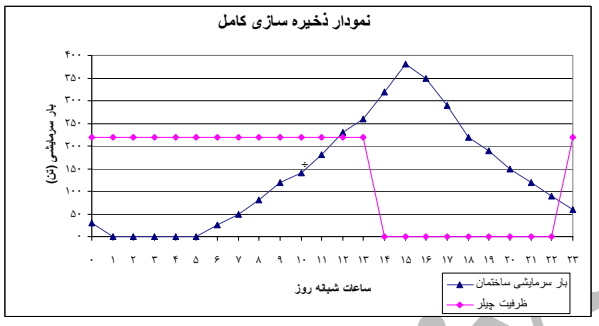
در بازه زمانی اشاره شده توان مصرف انرژی الکتریکی حتی از استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان ثابت نیز کمتر بوده و فقط ۸۰ کیلووات ساعت می باشد. در ساعت ۱۵ توان مصرف برق ۷۰ درصد نسبت به سیستم سرمایش مستقیم کاهش یافته است. اما در ساعات غیر پیک توان مصرف در این سیستم ۲۰ درصد بیشتر از سیستم ذخیره سازی با توان برودتی ثابت است.

با مراجعه به جداول ۶ و ۷ ، جزییات تعرفه مصرف برق در استان تهران، هزینه برق مصرفی سیستم ذخیره سازی قابل محاسبه است. در صورت استفاده از سیستم ذخیره سازی جزیی با توان متغیر چیلر در ۱۷ ساعت از شبانه روز با ظرفیت ۱۶۰ تن و در ۷ ساعت دیگر با ظرفیت ۸۰ تن در مدار خواهد بود. بهای مصرف برق سیستم در ماههای خرداد و تیر روزانه ۹۷۴۹۶۶ ریال می باشد. ملاحظه می شود که بکار گیری استراتژی ذخیره سازی جزیی با توان برودتی متغیر برای این ساختمان هزینه برق مصرفی را روزانه بیش از ۱۳۰۰۰۰ ریال افزایش می دهد.

استراتژی ذخیره سازی کامل

کاربرد این استراتژی بدین شکل است که طراح با توجه به ملاحظات پیک مصرف انرژی الکتریکی، ساعات اوج گرما، ظرفیت چیلر و توان سرمایه گذاری اولیه در ساعاتی از شبانه روز چیلر را کاملا خاموش کرده و فقط از انرژی سرمایشی ذخیره شده در تانک برای تامین سرمایش ساختمان استفاده می کند. در دیگر ساعات چیلر با توان ثابت کار می کند و با توجه به بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان بخشی یا همه ی مبرد خروجی از آن برای منجمد کردن آب درون توپ های یخی به سمت تانک ذخیره رفته و باقیمانده مبرد به سمت مبدل حرارتی و صرف تامین سرمایش مستقیم می شود. هرچه تعداد ساعات خاموشی چیلر افزایش یابد ظرفیت کارکرد چیلر در دیگر ساعات بیشتر شده و در نتیجه هزینه سرمایه گذاری افزایش می یابد. از لحاظ دیگر افزایش ساعات خاموشی چیلر میزان ذخیره سازی را بیشتر کرده و وابستگی به چیلر را در ساعات پیک مصرف برق کاهش می دهد. در این روش نیز تصمیم طراح در برآورد ساعات کارکرد و هزینه احداث چیلر بسیار تاثیر گذار خواهد بود.

در این مثال با در نظر گرفتن همه ی شرایط اشاره شده برنامه کاری چیلر بدین صورت طراحی شده که از ساعت ۱۴ تا ۲۳ به مدت ۹ ساعت به طور کامل خاموش می شود. کل بار سرمایشی ساختمان نمونه در یک شبانه روز ۳۲۸۵ تن ساعت می باشد. در نتیجه در ۱۵ ساعت باقیمانده چیلر باید بار سرمایشی مورد نیاز برای کل شبانه روز را فراهم کند. با تقسیم کل بار سرمایشی ساختمان بر ۱۵ ساعت کارکرد، ظرفیت چیلر ۲۱۹ تن در شرایط کارکرد انتخاب می شود. با در نظر گرفتن ۱۰ درصد ضریب اطمینان، چیلر با بار سرمایشی ۲۴۱ تن انتخاب می شود. در ۱۵ ساعت از شبانه روز قسمتی از توان سرمایشی چیلر صرف ذخیره سازی می شود و در ۹ ساعت دیگر فقط سیستم ذخیره سازی بار تبریدی ساختمان را تامین خواهد کرد. در این سیکل ۲۴۸۸ تن در هر روز انرژی سرمایشی ذخیره و مصرف می شود. نمودار تامین بار سرمایشی ساختمان را با این روش در شکل (۹) نشان داده شده است.



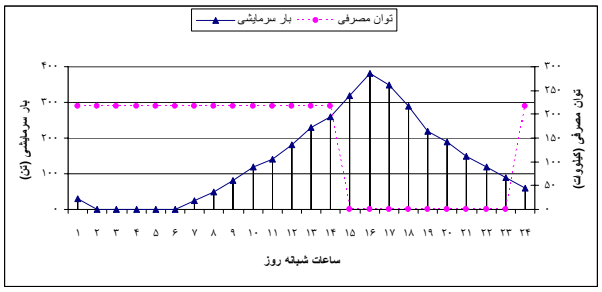
شکل ۹ : تامین بار برودتی ساختمان نمونه در یک شبانه روز به روش ذخیره سازی کامل

برآورد هزینه سرمایه گذاری اولیه برای احداث سیستم ذخیره سازی یخ بسته بندی شده با استراتژی ذخیره کامل برای این ساختمان نیز مانند روش های دیگر بوده با این تفاوت که هزینه خریداری چیلر بیشتر می باشد. با توجه به شکل (۱۰) برق مصرفی چیلر در استراتژی ذخیره کامل از ساعت ۱۴ تا ۲۳ صفر می باشد. این بهترین مزیت استفاده از این استراتژی است که در ساعات اوج مصرف برق چیلر خاموش می باشد.

در حالت بهره برداری از سیستم ذخیره سازی کامل برای ساختمان نمونه چیلر با توان ۲۱۹ تن کار می کند. برای محاسبه میزان برق مصرفی چیلر از نرم افزار کول پک استفاده می شود. توان مصرفی کمپرسور در ظرفیت کارکرد ۲۱۹ تن ۲۱۶.۶ کیلووات می باشد. با تقسیم توان مصرفی کمپرسور بر ظرفیت خنک کنندگی چیلر، توان مصرفی سیستم در حالت ذخیره سازی کامل برای ساختمان نمونه ۰/۹۹ کیلووات بر هر تن بدست می آید.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱۰ : توان مصرفی چیلر در حالت ذخیره سازی انرژی سرمایشی با استراتژی ذخیره کامل

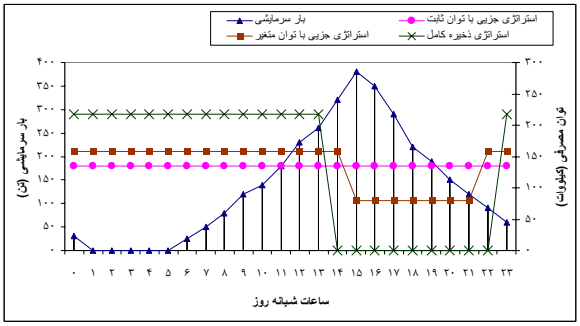
در شکل (۱۰) توان مصرفی سیستم ذخیره سازی جزیی با توان برودتی متغیر در ساعات مختلف شبانه روز و در مقایسه با بار سرمایشی مورد نیاز ساختمان ارائه شده است. در مقایسه با حالت سرمایش مستقیم (شکل ۵) ، مصرف برق در استراتژی ذخیره سازی کامل در ۹ ساعت از ساعات اوج گرما و پیک مصرف برق یعنی ساعات ۱۴ تا ۲۳ صفر است.

با مراجعه به جداول ۶ و ۷ ، جزییات تعرفه مصرف برق در استان تهران، هزینه برق مصرفی سیستم ذخیره سازی قابل محاسبه است. در صورت استفاده از سیستم ذخیره سازی کامل بهای مصرف برق سیستم در ماههای خرداد و تیر روزانه ۷۷۱۴۱۴ ریال می باشد. ملاحظه می شود که بکار گیری استراتژی ذخیره سازی کامل برای این ساختمان هزینه برق مصرفی را روزانه بیش از ۷۲۰۰۰ ریال کاهش می دهد.

نتایج

در این بررسی مزیت های بکارگیری از سیستم ذخیره سازی یخ بسته بندی شده معرفی شد و محاسبات برای یک ساختمان نمونه در تهران انجام گرفت. هرچه توان ذخیره سازی سیستم بیشتر شود، انرژی مضاعفی برای این ذخیره سازی صرف می شود اما با توجه به برآورد هزینه مصرف برق به صورت تعرفه متغیر اگر بتوان انرژی را در زمان ارزانی قیمت برق مصرف کرد در نهایت هزینه کلی مصرف کاهش می یابد. در شکل (۱۱) توان الکتریکی مصرفی سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی در استراتژی های مختلف با حالت سرمایش مستقیم مقایسه شده است. کاهش مصرف برق در ساعات پیک در همه ی استراتژی های ذخیره سازی نسبت به حالت سرمایش مستقیم مشهود است. بکار گیری هر نمونه از استراتژی های ذخیره سازی به مراتب به صرفه تر و مفید تر از اجرای سیستم های سرمایش مستقیم است.

محاسبات نشان می دهد که هرچه انرژی سرمایشی ذخیره شده بیشتر می شود، هزینه سرمایه گذاری اولیه نیز افزایش و هزینه مصرف برق کاهش می یابد. هزینه مصرف برق برای ساختمان نمونه در این بررسی در حالت سرمایش مستقیم کمتر از سیستم ذخیره سازی یخ بسته بندی شده با استراتژی های ذخیره سازی جزیی با توان ثابت و متغیر است. البته این مسئله به معنای عدم کارایی این سیستم نمی باشد زیرا هزینه سرمایه گذاری اولیه در استراتژی های ذخیره جزیی با توان ثابت و ذخیره جزیی با توان متغیر به ترتیب ۲۶ و ۱۲ درصد نسبت به روش سرمایش مستقیم کاهش یافته است. در استراتژی ذخیره سازی کامل با افزایش ۱۸ درصد در سرمایه گذاری اولیه نسبت به روش سرمایش مستقیم هزینه روزانه مصرف برق بیش از ۷۲۰۰۰ ریال کاهش می یابد که قادر است اضافه پرداختی در سرمایه گذاری اولیه را طی مدت ۸۱ ماه جبران نماید.



شکل ۱۱ : مقایسه مصرف برق استراتژی های برای ساختمان نمونه

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

استفاده از سیستم ذخیره سازی یخ بسته بندی شده به مصرف انرژی الکتریکی تاسیسات سرمایشی را در ساعات اوج مصرف کاهش داده و به بازه زمانی دیگری منتقل می کند. از نظر کاهش هزینه مصرف برق و سرمایه گذاری اولیه احداث تاسیسات خنک کننده نیز با توجه به نوع استراتژی ذخیره سازی محاسبات و نتایج برای ساختمان های مختلف ممکن است متفاوت باشد به ویژه اگر نوع کاربری و گسترش نیاز به بار سرمایشی مغایر با ساختمان نمونه این بررسی باشد.

مراجع

[۱]- تراز نامه انرژی، انتشارات وزارت نیرو، ۱۳۸۵
[۲]- تعرفه مصرف برق وزارت نیرو Tarrefeh.ir
[3]- Design Guide for Cool Thermal Storage, charles E.Dorgan, James S. Elleson, Pub. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1993
[4]- www.Cryogel.com, www.anmascorp.com
[5]- Economic feasibility of Thermal Energy Storage System, B.A. Habeebullah, Energy and Buildings (39) 2007.
[6]- On Thermal energy storage systems and applications and buildings, Ibrahim Dincer – energy and buildings 34 (2002).
[7]- CoolPack software Version 1.46, available at http://www.et.dtu.dk/CoolPack

Archive of SID
www.SID.ir