درسنامهٔ تهویه مطبوع

انبارهٔ یخ ۱۱

محمدرضا سلطاندوست

انبارهٔ یخ

انبارهٔ یخ

ترجمه و تألیف: محمدرضا سلطاندوست

سرشناسه	سلطاندوست، محمد رضا، ۱۳۴۱ -
عنوان و نام پدیدآور	انباره یخ/ترجمه و تالیف محمدرضا سلطاندوست.
مشخصات نشر	تهران : یزدا ، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری	۱۴۴ ص.: مصور، جدول، نمودار؛ ۵/۱۹×۵/۹ س‌م.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۱۶۵-۹۳۴-۸
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا
یادداشت	کتابنامه:ص. ۱۳۹.
موضوع	سردسازی و دستگاه‌های سردکننده
	Refrigeration and refrigerating machinery
رده‌بندی کنگره	TP۴۹۲
رده‌بندی دیویی	۶۲۱/۵۶
شماره کتابشناسی ملی	۸۷۰۷۴۷۵
اطلاعات رکورد کتابشناسی	فیپا

انبارهٔ یخ

ترجمه و تألیف: محمدرضا سلطاندوست

ناشر: یزدا / **چاپ اول:** پاییز ۱۴۰۰ / **قطع:** پالتویی / **تعداد صفحات:** ۱۴۴ صفحه / **آماده‌سازی قبل از چاپ:** نشریه تهویه و تبرید / **ویراستار:** فرزانه پایدار داریان / **مدیر تولید:** محمد پیروزمند / **طراح روی جلد:** سهند سلطاندوست / **چاپ و صحافی:** یزدا / **شمارگان:** ۱۰۰ نسخه /

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۵-۹۳۴-۸ **ISBN:** 978-600-165-934-8

نشر یزدا و گروه نشریات

دفتر نشر و نمایشگاه دائمی: تهران، سیدخندان، خیابان ارسباران، کوچه‌ی ستاری، شماره‌ی ۲۲، ساختمان یزدا **دورنگار:** ۲۲۸۸۵۶۵۱ (۰۲۱) **تلفن:** ۵۰-۲۲۸۸۵۶۴۷ (۰۲۱)

توجه: به موجب قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸/۱۰/۱۱ و همچنین قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی مصوب سال ۱۳۵۰ تمام حقوق این اثر به هر نحو برای مؤلف محفوظ است. نشر و پخش تمام یا قسمتی از این کتاب بدون اجازه از مؤلف، باعث پیگرد قانونی خواهد شد.

خرید آنلاین: www. yazdamarket. com

اینستاگرام: https://www. instagram. com/yazdamarket/

فهرست

مقدمه ۸
ذخیره‌سازی انرژی ۹
انبارهٔ یخ بر پایهٔ گلیکول ۱۰
نمودار بار سرمایی ساختمان ۱۲
دوره‌های اوج مصرف و فرود مصرف ۱۴
سرمایش با یخ در دورهٔ اوج مصرف ۱۶
سرمایش با یخ و چیلر در دورهٔ اوج مصرف ۱۸
اصلاح اوج در مقابل جابه‌جایی بار ۱۹
انتخاب چیلر کم ظرفیت نسبت به بار ۲۲
اجزای سیستم ذخیره‌سازی یخ ۲۳
منبع ذخیره یخ ۲۴
تأثیر دما و دبی بر نرخ انجماد ۲۶
فرایند تولید یخ در مخزن ۲۸
چیلر یخ‌ساز ۲۹
تأثیر ظرفیت چیلر(با کمپرسور جابه‌جایی مثبت) ۳۱
تأثیر ظرفیت چیلر گریز از مرکز ۳۳
محلول آب- ضدیخ ۳۴
تأثیر محلول آب-ضدیخ بر کوئل‌های سرمایی ۳۷
تأثیر محلول آب-ضدیخ بر چیلر ۴۳
فرایند طراحی سیستم سرمایی ذخیرهٔ یخ ۴۴
مرحلهٔ دوم: نیازهای سرمایش در اوج مصرف ۴۷
مرحلهٔ دوم: سرمایش فقط با یخ در اوج مصرف ۴۸
مرحلهٔ دوم: سرمایش با یخ و چیلر در اوج مصرف ۴۹
مرحلهٔ دوم: تحلیل ساعتی انرژی ۵۱
مرحلهٔ دوم: پروفیل بار سرمایی سالانه ۵۳
مرحلهٔ سوم: انتخاب مخزن و چیلر ۵۶

مرحلهٔ سوم: تعادل مخازن و چیلرها ۵۸
مرحلهٔ سوم: نرخ دبی سیال و اختلاف دمای انجماد ۵۹
مرحلهٔ سوم: دمای نزدیکی مخزن ۶۰
مرحلهٔ سوم: اختلاف دمای کوئل ۶۲
انتخاب چیلر – حالت یخ ساختن ۶۴
انتخاب چیلر – حالت سرمایش متعارف ۶۸
ظرفیت سرمایی اضافی برای روز ۷۰
چیلر متعادل سازی - بار ۷۱
چیلر پایه ۷۲
چیدمان یک سیستم کوچک ۷۴
چیدمان یک سیستم بزرگ ۷۶
پائین‌دست یا بالا دست ۷۸
مخازن یخ در پائین‌دست چیلر ۷۹
مخازن یخ در بالا دست چیلر ۸۱
نتیجهٔ مثال قبل : پائین‌دست یا بالا دست ۸۳
اصلاح سیستم موجود ۸۵
مبدل حرارتی میانی ۸۷
کنترل سیستم مجهز به انبارهٔ یخ ۸۸
شناسایی اجزای کنترل شده ۹۱
شناسایی اجزای کنترل‌شده و حالت «فقط چیلر» ۹۳
حالت «فقط یخ» ۹۵
حالت «چیلر و یخ» ۹۷
حالت «انجماد» ۹۹
حالت «انجماد و سرمایش» ۱۰۱
حالت «خاموش» ۱۰۳
جدول کامل شدهٔ کنترل تاکتیکی ۱۰۴
شناسایی اجزای یک سیستم انبارهٔ یخ بزرگ ۱۰۵
حالت «فقط چیلر» در سیستم بزرگ ۱۰۷
حالت «فقط یخ» در سیستم بزرگ ۱۰۹

حالت «چیلر و یخ» در سیستم بزرگ ۱۱۱
حالت «انجماد» در سیستم بزرگ ۱۱۳
حالت «انجماد و سرمایش» در سیستم بزرگ ۱۱۴
حالت «خاموش» در سیستم بزرگ ۱۱۶
کنترل استراتژیک ۱۱۷
دوره‌های زمانی اوج و غیراوج ۱۱۸
جدول کنترل استراتژیک ۱۱۹
حالت «فقط چیلر» ۱۲۰
حالت «فقط یخ» ۱۲۱
حالت «چیلر و یخ» ۱۲۲
حالت «انجماد» ۱۲۳
حالت « پایان انجماد» ۱۲۵
حالت « انجماد و سرمایش» ۱۲۶
جدول کامل شدهٔ کنترل استراتژیک ۱۲۷
ترکیب کنترل تاکتیکی و استراتژیک ۱۲۹
انجماد و سرمایش ۱۳۰
کندی ذوب یخ ۱۳۱
تندی ذوب یخ ۱۳۳
زمان بهینهٔ ذوب یخ ۱۳۴
بارگذاری اتفاقی ۱۳۵
اصلاح اوج ۱۳۶
کنترل تاکتیکی و استراتژیک ۱۳۷
مراجع ۱۳۹

مقدمه

بزرگترین مزیت استفاده از انباره‌های یخ یا ذخیره‌سازی سرما، کاهش هزینه‌های مصرف برق در اوقات اوج مصرف است که متأسفانه آن‌طور که باید در ایران مورد استقبال طراحان قرار نگرفته اســـت. در حالی که اســـتفاده از این سیستم اگر چه ممکن است هزینه‌های اولیه یک پروژه را افزایش دهد؛ اما به نسبت چرخهٔ عمر ساختمان این هزینه‌ها خیلی زود مستهلک و تبدیل به سیستمی سودمند و صرفه‌جویانه می‌شوند. البته ممکن اســـت یکی از دلایل کم‌توجهی به چنین سیستمی، عدم استفاده از کنتورهای برق چند تعرفه‌ای و عدم حمایت شرکت‌های برق و نیز عدم وجود سیاست‌های تشویقی باشد. زیرا اســـتفاده از چنین سیستمی تنها زمانی مقرون به صرفه است که بتوان از برق کم هزینه در اوقات غیراوج استفاده کرد.

همواره یکی از دغدغه‌های استفاده از چیلرهای تراکمی به‌رغم ضریب کارایی نســـبتاً زیاد آنها، هزینه‌های مربوط به مصرف برق بوده و کماکان هســـت. در حالی که استفاده از انباره‌های یخ و ذخیره‌ســـازی سرما در حد قابل ملاحظه‌ای این دغدغه را از بین می‌برد.

ترکیب رویایی ضریب کارایی نسبتاً زیاد چیلرهای تراکمی و کاهش هزینه‌های مصرف برق، به ســـهولت با استفاده از سیســـتم‌های ذخیره‌سازی سرما، که یک از آنها به کارگیری انباره‌های یخ است، به سهولت قابل تحقق است.

محمدرضا سلطاندوست

پائیز یک‌هزار و چهارصد

ذخیره‌سازی انرژی

ذخیره‌ســـازی انرژی گرمایی[1] (TES) یعنی افـــزودن انرژی گرمایی به یک واسط ذخیره ساز و سپس بازپس‌گیری آن از همان واسط برای استفاده در زمان دیگری است. این ممکن است شـــامل ذخیرهٔ انرژی گرمایی در دماهای بالا (ذخیرهٔ گرما) یا در دماهای پایین (ذخیرهٔ ســـرما) باشد. به عنوان مثال آب واسط بسیار خوبی برای ذخیره‌سازی انرژی است. بـــا صرف انرژی و افزایش و یا کاهش دمای آب، می‌توان آب گرم یا آب سرد تهیه کرد؛ که هر دو با توجه به حجم و دمایی که دارند می‌توانند به عنـــوان منبع انرژی در مکان و زمان دیگری مورد استفاده قرار گیرند.

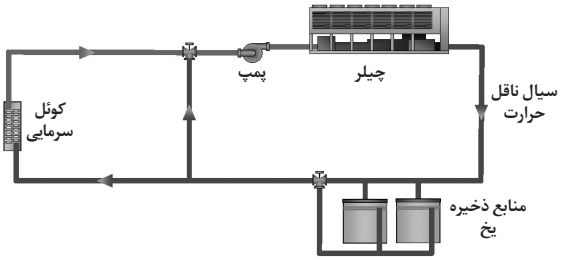
در تهویه مطبوع و سرمایش ســـاختمان، متداول‌ترین واسط مورد استفاده برای ذخیره‌سازی سرما، همان آب در دو شکل مایع و جامد است.

ایدهٔ اصلی ذخیره‌ســـازی سرما بسیار ساده است. یک یا چند چیلر در زمان‌های مشخصی آب را سرد می‌کنند و آب سرد شـــده در یک یا چند منبع برای استفاده در زمان‌های دیگری ذخیره می‌شـــود. اما همان‌گونه که اشاره شده برای ذخیره‌ســـازی ســـرما دو امکان وجـــود دارد. اول، تهیهٔ و ذخیره‌سازی آب سرد و دوم، تهیهٔ و ذخیره‌سازی یخ. در این کتاب تمرکز بر تهیه و ذخیره‌سازی یخ است.

---

1 *Thermal Energy Storage(TES)*

انبارۀ یخ بر پایۀ گلیکول



برای ذخیره‌ســـازی یخ چندین فناوری وجود دارد که برای مدت کوتاهی رایج شدند و ســـپس بازار را ترک کردند. اما سیســـتم‌های ذخیرۀ یخ مبتنی بر گلیکول هم‌چنان بسیار محبوب هســـتند. زیرا ضمن سادگی شبیه به سیستم‌های معمولی آب ســـرد کار می‌کنند. بنابراین در هر کاربردی که برای سیستم آب سرد مناســـب باشد، استفاده از انبارۀ یخ مبتنی بر گلیکول نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

این نوع سیستم ذخیره‌سازی یخ از یک چیلر برای خنک کردن سیال که مخلوطی از آب و ضدیخ (مانند گلیکول)، تا دمای زیر نقطه انجماد آب استفاده می‌کند.

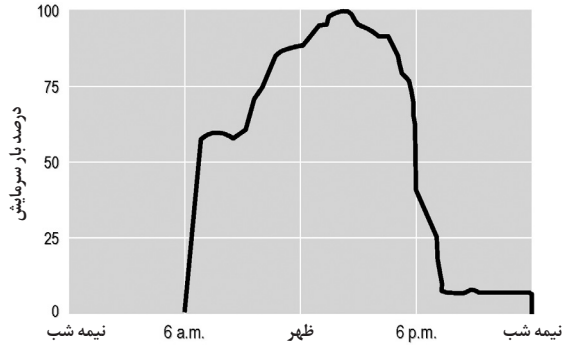
سیال مخلوط(آب و گلیکول) به یک یا چند منبع ذخیرۀ یخ پمپ می‌شود و با تبادل حرارت موجب یخ زدن آب درون منابع می‌شود.

چنان‌چه در زمانی دیگر، ســـرما مورد نیاز باشد، سیال

ناقل حرارت یا همان سیال مخلوط این بار از انبارۀ یخ پمپ می‌شود، اما در دمایی بالاتر از نقطۀ انجماد آب.

در واقع در این حالت انبارۀ یخ با اخذ گرما از سیال ناقل موجب سرد شدن سیال می‌شود و خود نیز با افزایش دمای ناشی از تبادل حرارت ذوب و به مایع تبدیل می‌شود. نکته در این فرایند جابه‌جایی چیلر و انبارۀ یخ با یکدیگر است. زمانی چیلر نقش مولد را بازی می‌کند و ضمن سرمایش، موجب تولید یخ می‌شود و در زمانی دیگر این انبارۀ یخ است که به جای چیلر نقش مولد را به عهده می‌گیرد.

نمودار بار سرمایی ساختمان



بزرگترین مزیت به کارگیری انبارهٔ یخ در یک سیستم تهویه مطبوع کاهش کار چیلر در اوقاتی است که تعرفهٔ مصرف برق گران‌تر است.

انبارهٔ یخ کمک می‌کند که ساعات کارکرد چیلر جابه‌جا شود. بنابراین چیلر در اوقاتی که هزینهٔ مصرف برق کمتر است فعال شده و یخ تولید می‌کند و سپس انرژی ذخیره شده یخ در اوقاتی که هزینهٔ مصرف برق زیاد است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

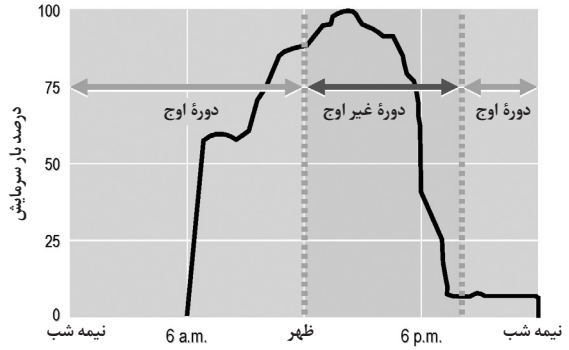
تصویر بالا نمودار اوج و فرود بار سرمایی یک ساختمان مفروض را نمایش می‌دهد. بین نیمه شب تا 6 صبح، ساختمان خالی از سکنه است و بار سرمایشی وجود ندارد. در ساعت 6 صبح، تجهیزات مولد شروع به کار می‌کنند تا شرایط داخلی را برای حضور افراد مناسب کنند.

با حضور افراد در ساختمان بار سرمایشی بیشتر و بیشتر

می‌شود، و شرایط زمانی هوای بیرون و آفتاب نیز افزایش بار سرمایی را تشدید می‌کند. به نحوی که از ساعت 11 صبح به بعد بار سرمایی بی‌وقفه افزایش می‌یابد و در حدود 4 بعد از ظهر به اوج خود می‌رسد. اما پس از حدود ساعت 5 بعد از ظهر به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

به تدریج و وقتی که افراد ساختمان را ترک می‌کنند و شرایط هوای بیرون و آفتاب ملایم‌تر می‌شود بار کاهش می‌یابد و تنها یک بار سرمایی کوچک وجود خواهد داشت که در تمام ساعات بعدازظهر، تا نیمه شب ادامه دارد.

دوره‌های اوج مصرف و فرود مصرف



اکثر شرکت‌های برق بیشـــترین تقاضا برای برق را در طول روز تجربه می‌کنند و برخـــی حتی با کمبود ظرفیت مواجه هستند. برای تشـــویق کاهش مصرف برق در این زمان‌ها، بسیاری از شرکت‌های خدمات برق نرخ‌های زمانی روزانه را تعیین کرده‌اند که پنجره‌های زمانی برای برق با هزینهٔ بالاتر در این دوره‌های پر تقاضا ایجاد می‌کنند. ساعاتی که هزینهٔ برق زیاد اســـت اغلب به عنوان دورهٔ «اوج مصرف»[1] نامیده می‌شود. از سوی دیگر، دورهٔ «فرود مصرف»[2] یا «غیراوج» به ساعاتی اتلاق می‌شـــود که هزینهٔ برق کمتر است. نکتهٔ مهم اینجاســـت که لزوماً دوره‌های اوج و فرود مصرف برق برای تعیین هزینه‌ها منطبق بر اوج و فرود نیازهای سرمایشی نیســـت. به این منظور باید دوره‌های اوج و فرود هزینه‌های برق بر منحنی بار سرمایشـــی در یک نمودار بر هم منطبق

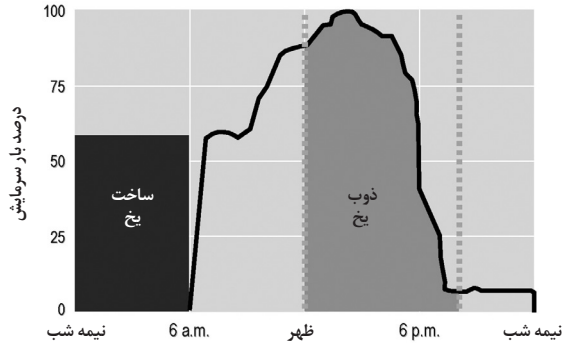
1 *On peak*
2 *Off peak*

شوند تا مشخص شود در چه زمان‌های منحنی بار در پنجرهٔ یا محـــدودهٔ اوج و فرود هزینه‌های برق قرار می‌گیرد. تصویر بالا نشـــان‌دهندهٔ منحنی بار مثال مبحث قبلی در محدودهٔ دوره‌هـــای اوج و فرود مصرف برق و هزینه‌های مربوط به آن است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، منحنی بار سرمایش از ظهر تا 8 شب در محدودهٔ اوج مصرف و تمام ساعات دیگر در محدودهٔ فرود مصرف یا غیراوج قرار گرفته است.

یکی دیگـــر از مؤلفه‌های رایج نرخ بـــرق، هزینهٔ مربوط به شـــارژ تقاضا یا همان دیماند[1] اســـت. باید به تعیین نرخ دیماند توجه داشـــت. زیرا گاهی اوقات این هزینه بر اساس بیشـــترین توان (کیلووات) مصرفی یا تقاضای استفاده شده توسط ساختمان در یک بازهٔ زمانی مشخص است و یا هزینهٔ ثابتی است که با توجه به توان نصب شده تعیین شده است و ممکن است هر ســـال یا هر چند سال افزایش پیدا کند. به‌طور معمول، یا هزینهٔ تقاضا(دیماند) فقط برای دورهٔ اوج مصرف اعمال می‌شـــود، یا هزینهٔ تقاضا در اوج به‌طور قابل توجهی بیشـــتر از هزینهٔ تقاضای خارج از اوج است. در هر حال در برنامه‌ریزی برای چگونگی اســـتفاده از انبارهٔ یخ به منظـــور کاهش هزینه‌های برق باید نحوهٔ تعیین نرخ دیماند مطابق با قرارداد مشترک با شرکت فروشندهٔ برق مورد توجه قرار گیرد.

1 *Demand*

سرمایش با یخ در دورهٔ اوج مصرف



انباره‌هـــای یخ، هزینه‌های ماهانه بـــرق را با ذوب کردن یخ کاهش می‌دهند تا بارهای ســـرمایی ســـاختمان را در طول دورهٔ اوج مصرف بـــرآورده کنند. با این کار از برق مورد نیاز برای کارکرد چیلر در آن بازهٔ زمانی جلوگیری می‌شـــود یا به میزان قابل توجهی کاهـــش می‌یابد. عملکرد چیلر به دورهٔ فرود مصرف منتقل می‌شـــود که طی آن هزینهٔ برق کمتر و دیمانـــد کمتر یا وجود ندارد. چیلر در آن دوره برای یخ زدن آب داخل مخازن ذخیره‌سازی استفاده می‌شود و انرژی را تا دورهٔ اوج مصرف ذخیره می‌کند.

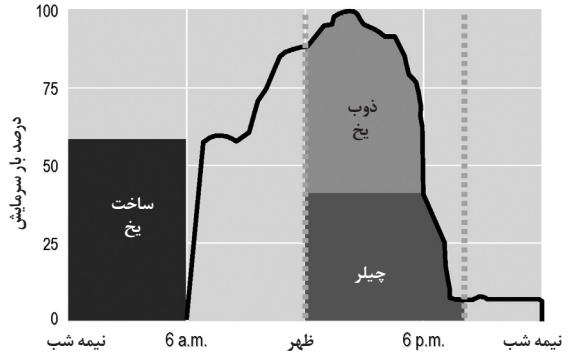
در نمودار بالا که ادامهٔ مثال مباحث قبلی است، بارهای سرمایشی ساختمان که در دورهٔ اوج مصرف که بین ظهر تا 8 بعد از ظهر اتفاق می‌افتد، با ذوب شدن یخ‌های ذخیره شده تأمین و چیلر خاموش می‌شود.

اســـتفاده از این نوع سیستم که اغلب «سیستم ذخیرهٔ

کامل»[1] نامیده می‌شـــود، تنها در صورتی امکان‌پذیر است که ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا بارهای سرمایی در اوج مصرف را برای یک روز معین برآورده کند.

1 *Full – storage system*

سرمایش با یخ و چیلر در دورهٔ اوج مصرف

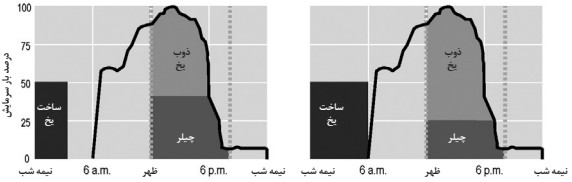


عملاً هزینهٔ نصب یک «سیستم ذخیره کامل» که در مبحث قبلی به آن اشـــاره شـــد، ممکن اســـت امکان‌پذیر نباشد. بسیاری از سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ ظرفیت کافی برای برآورده کردن تنها بخشـــی از بارهای سرمایی در اوقات اوج مصرف را دارند. این نوع سیستم اغلب «سیستم ذخیره‌سازی جزئی»[1] نامیده می‌شود. تصویر بالا نمایش دهندهٔ سیستم ذخیره‌سازی جزئی است که در آن، بارهای سرمایی‌ای که در طول دورهٔ اوج رخ می‌دهد با ذوب یخ و کارکرد چیلر تأمین می‌شـــود. اما چیلر با ظرفیت و انرژی کمتری کار می‌کند. بارهای سرمایی بیشتر از ظرفیتی که برای چیلر در نظر گرفته شده با ذوب یخ ذخیره شده جبران می‌شود.

خاموش کردن چیلر یا کاهش قابل توجه ظرفیت آن در دورهٔ اوج مصرف، مصرف برق با قیمت بالاتر را کم می‌کند و تقاضای برق در اوج مصرف را نیز کاهش می‌دهد.

1 *Partial – storage system*

اصلاح اوج در مقابل جابه‌جایی بار



جابه‌جایی بار　　اصلاح اوج

در نگاه اول، ممکن اســت به نظر برســد که یک سیستم ذخیره‌سازی یخ که برای کاهش دیماند در اوج (kW) طراحی شده اســت، همان سیستمی است که برای کاهش مصرف برق در اوج (kWh) طراحی شــده است. اما چنین نیست و این که کدام یک از این دو در شــرایطی مشخص مهم‌ترند، می‌تواند به‌طور قابل توجهی نحوهٔ طراحی و یا کنترل سیستم را تغییر دهد. در «سیســتم ذخیره‌سازی جزئی»[1] دو روش برای بهره‌برداری از انبارهٔ یخ برای کاهش هزینه‌های مصرف برق متناسب با هزینهٔ دیماند و هزینهٔ مصرف، قابل استفاده است که این دو روش در نمودارهای تصویر بالا نمایش داده شده است.

بــرای کاهش دیماند در اوج، سیســتم باید یخ را فقط زمانــی ذوب کند که نیاز الکتریکی ســاختمان در بالاترین حد باشــد. بنابراین وجود یخ در داخــل مخزن تا پایان روز

1 *Partial – storage systm*

کامـــلاً قابل قبول اســـت. این روش، که «اصـــلاح اوج»[1] نامیده می‌شود، معمولاً زمانی کاربرد دارد که میزان دیماند یـــا «تقاضای الکتریکی در اوج (کیلووات)» بالا باشـــد، اما «نرخ‌های مصرف برق (کیلووات ساعت)» تقریباً از دوره‌های «فرود مصرف» تا «اوج بار» برابر است.

با روش «اصـــلاح اوج» ذوب یخ به کمک چیلر می‌آید. بنابراین چیلر با ظرفیت کمتری کار خواهد کرد و از مصرف قابل توجه بـــرق در اوقات «فرود مصـــرف» یا همان زمان غیراوج جلوگیری می‌کند. زیرا دلیل استفاده از انبارهٔ یخ این است که چیلر باید بیشـــتر در زمانی کار کند که تعرفهٔ برق ارزان‌تر است. در هر صورت در روش «اصلاح اوج» با ترکیب کارکرد انبارهٔ یخ و چیلر سعی می‌شود تا تعادلی بین کاهش دیماند(تقاضا) در«اوج مصرف» با ذوب یخ و افزایش مصرف بـــرق در زمان غیراوج(فرود مصرف) بـــا کاهش بار چیلر به وجود آید.

نمودار ســـمت چپ بالا نشان می‌دهد که نسبت کارکرد چیلر و ذوب یخ تقریباً 40 درصد به 60 درصد اســـت و زمان یخ‌ســـازی توسط چیلر نیز به نصف تقلیل یافته، زیرا بخشی از ظرفیـــت چیلر مصروف جبران بار در محدودهٔ اوج مصرف شده است.

در روش دیگر، بـــرای کاهش مصرف برق در اوقات اوج مصرف، سیســـتم باید هر روز تا حد امکان یخ را ذوب کند. این رویکرد که «تغییر بار» نامیده می‌شـــود، معمولاً زمانی اســـتفاده می‌شـــود که نرخ مصرف بـــرق در اوج (کیلووات

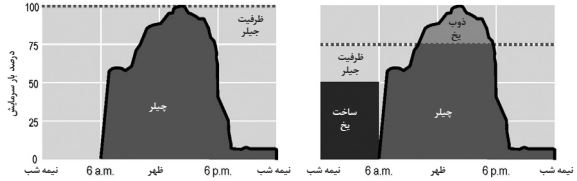
1 *Peak shaving*

ساعت) به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نرخ مصرف خارج از اوج باشـــد. تغییر بار با ذوب کردن تمام یخ‌ها در دورهٔ اوج بار، و تغییر عملکرد چیلر به دورهٔ خاموشی، تا حد امکان مصرف برق در اوقات اوج را کاهش می‌دهد.

نمودار سمت راست نشـــان‌دهندهٔ وضعیت«جابه‌جایی بار» اســـت. همان‌طور که مشاهده می‌شـــود در این روش نســـبت کار چیلر به ذوب یخ در اوقات اوج مصرف به مراتب کمتر و در حدود 25 درصد اســـت، اما زمان کار شبانه چیلر برای یخ‌سازی تقریباً دو برابر زمان یخ‌سازی در روش «اصلاح اوج» اســـت. زیرا برای کار کمتر چیلر در اوقات اوج مصرف نیاز به یخ بیشتری برای ذوب شدن وجود دارد.

در حالی که ممکن است سیســـتمی که برای «اصلاح اوج» طراحی شده باشد ظرفیت ذخیره‌سازی یخ یکسانی با سیستم طراحی شده برای «جابه‌جایی بار» داشته باشد، اما این دو سیستم به‌طور متفاوتی کنترل می‌شوند.

انتخاب چیلر کم ظرفیت نسبت به بار



چیلر با اندازهٔ کامل

چیلر با اندازهٔ کوچکتر

علاوه بر کاهش هزینه‌های ماهانه برق، یکی دیگر از مزایای ذخیره‌سازی یخ کاهش اندازه و ظرفیت تجهیزات مولد سرمایی مکانیکی در صورت نیاز است.

هنگامی که از انبارهٔ یخ برای برآوردن تمام یا بخشی از بار سرمایی طراحی استفاده می‌شود، ممکن است تا وقتی که ظرفیت چیلر به گونه‌ای باشد که زمان کافی برای یخ‌سازی مجدد آب داخل مخازن را داشته باشد، چیلر را می‌توان کوچک کرد.

چیلرهای تراکمی کوچکتر، خود منجر به کاهش مصرف انرژی الکتریکی و نیز کوچکتر شدن تأسیسات الکتریکی و کمتر شدن هزینه‌های نصب می‌شود.

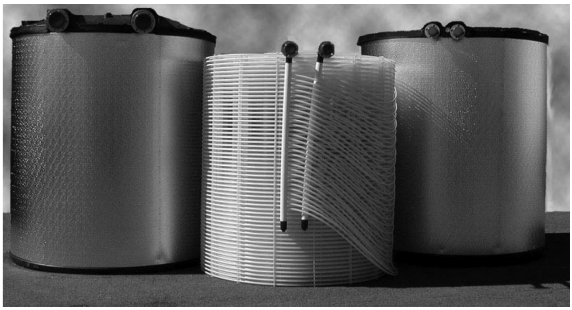
البته تهیه و نصب انبارهٔ یخ، هزینه‌های پروژه را افزایش می‌دهد، اما کوچک شدن تجهیزات مولد سرمایشی ممکن است بخشی از (یا در مواردی تمام) هزینه‌ها را جبران کند.

اجزای سیستم ذخیره‌سازی یخ

سیســـتم ذخیره‌ســـازی یخ مبتنی بر گلیکول – آب، شامل اجزای اصلی زیر است:

- منبع ساخت یخ و ذخیره
- چیلر سازندهٔ یخ
- ســـیال تبادل حرارت مانند اتیلن گلیکـــول و پروپلین گلیکول
- کوئل

منبع ذخیره یخ



نوع منبع ذخیره که بیشـــتر در سیســـتم ذخیره‌سازی یخ مبتنی بر گلیکول استفاده می‌شود، مخزن استاتیک نامیده می‌شود. نمونه‌ای از این نوع منابع در تصویر بالا نشان داده شده است.

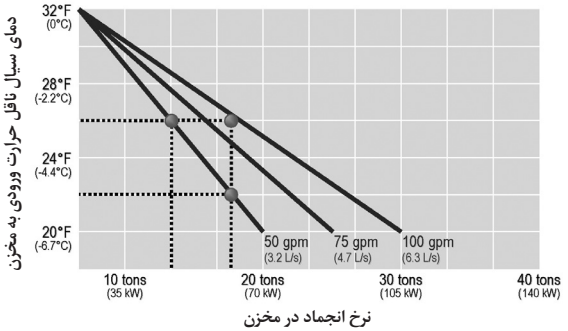
مخزن اســـتاتیک یک ظرف بســـته حـــاوی یک مبدل حرارتی از نوع فولادی یا پلیمری اســـت که برای یخ زدن آب در یک قسمت از روز و ســـپس ذوب یخ در قسمت دیگری از روز استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این مبدل در تصویر بالا دیده می‌شود.

مبدل‌هـــای پلیمـــری از نوع پلی اتیلن یـــا پلی پروپیلن هســـتند. لوله‌های متعدد و موازی مبدل حرارتی دارای دو کلکتور رفت و برگشـــت در دو سوی لوله‌ها هستند که این کلکتورها به آب رفت و برگشـــت سیســـتم سرمایی متصل می‌شوند.

نکتهٔ قابل توجه این اســـت کـــه آب حاصل از ذوب یخ از مخزن خارج نمی‌شـــود، بلکه این مقدار آب ثابت است و به تناوب از حالت مایع به جامد و برعکس تبدیل می‌شـــود. سیستم‌های بزرگتر ممکن است از چندین مخزن کوچکتر که به هم متصل شده‌اند، استفاده کنند.

منابع ذخیره یخ در اندازه‌های مختلف موجود هستند و مساحت سطح مبدل حرارتی معمولاً برای اندازه و چیدمان مشـــخص ثابت اســـت. بنابراین، تغییر نرخ جریان سیال یا تغییر دمای سیال ورودی تنها ابزار تغییر نرخ انجماد(سرعت تشـــکیل یخ) یا نرخ ذوب (سرعت تبدیل به آب) در طراحی مخزن معین است.

تأثیر دما و دبی بر نرخ انجماد



تصویر بالا نرخ انجماد یک نمونهٔ منبع ذخیرهٔ یخ را نشـــان می‌دهد.

وقتی کـــه دمای ســـیال ورودی (-3.3°C) 26°F و دبی ســـیال 50 گالن در دقیقه (3.2 لیتر در ثانیه) باشـــد، نرخ انجماد این مخزن 13.3 تن تبرید (46.8 کیلووات) است.

با کاهش دمای ســـیال ورودی بـــه (-5.6°C) 22°F ، با همان دبی ســـیال، نرخ انجماد به حدود 17 تن تبرید (59.8 کیلـــووات) افزایش می‌یابد. با این حال، برای دســـتیابی به نـــرخ انجماد معـــادل و بالاتر با دمای ســـیال ورودی اولیه (-3.3°C) 26°F باید دبی سیال تقریباً دو برابر شود.

افزایش دبی سیال انتقال حرارت، مصرف انرژی پمپ را افزایش می‌دهد.

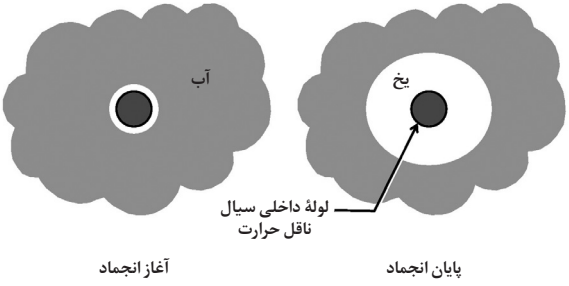
کاهـــش دمای ورودی به مخزن مصـــرف انرژی چیلر را افزایش می‌دهد.

سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ که به خوبی طراحی شده‌اند، این دو (یعنی افزایش دبی و کاهش دمای ورودی) را متعادل می‌کنند.

در بین این دو رویکرد، کاهش دمای سیال ورودی معمولاً مؤثرترین وسیله برای افزایش نرخ انجماد است. معمولاً به سیستمی منجر می‌شود که هزینهٔ نصب کمتری دارد و انرژی کمتری نسبت به سیستمی با دبی بالاتر مصرف می‌کند. در نمودار مورد مثال، نرخ انجماد با کاهش دمای سیال ورودی تنها 4°F (2.3°C) افزایش می‌یابد.

تغییر دبی در مخزن معمولاً برای تنظیم نرخ ذوب، زمانی که مخازن برای برآوردن بار سرمایی ساختمان استفاده می‌شوند، کاربرد دارد.

فرایند تولید یخ در مخزن



اثربخشی انتقال حرارت در داخل یک مخزن ذخیره یخ ساکن در طول فرآیند انجماد متفاوت اســت. آب ابتدا روی سطح بیرونی لوله‌های مبدل حرارتی یخ می‌زند، ســپس به سمت بیرون به یخ زدن ادامه می‌دهد. گرما از آب اطراف لوله‌های پوشــیده از یخ، از طریق یخ به مایــع انتقال حرارت داخل لوله‌ها منتقل می‌شــود. تقریباً در ابتــدای فرآیند انجماد، یخ بســیار نازک است و تأثیر کمی بر انتقال حرارت دارد. با پیشــرفت انجماد، یخ ضخیم‌تر و به‌طور قابل توجهی مانع انتقال حرارت می‌شود. برای حفظ همان نرخ انجماد با این انتقال حرارت تخریب‌کننده، دمای سیال ورودی به مخزن ذخیره یخ باید در پایان فرآیند انجماد کاهش یابد. سازندگان مخازن یخ معمولاً دمای متوسط سیال ورودی و دمای سیال ورودی نهایی را برای هر کاربری خاص ارائه می‌دهند.

چیلر یخ‌ساز



چیلر با کندانسور هوایی



چیلر با کندانسور آبی

در بسیاری از سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ، می‌توان از همان چیلری که برای سرمایش ساختمان استفاده می‌شود، برای ساخت یخ نیز استفاده کرد.

نقش دوگانهٔ چیلر یخ‌ساز می‌تواند هزینهٔ نصب سیستم را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

با این حال، یک چیلر یخ‌ساز با توجه به دو نقطهٔ تنظیم دمای سیال خروجی از چیلرهای متعارف، متفاوت است. یک چیلر متعارف و فقط سرمایی، ظرفیت خود را در پاسخ به تغییر بار سرمایشی افزایش یا کاهش می‌دهد تا دمای سیال خروجی را در یک نقطهٔ تنظیم دلخواه حفظ کند. یک چیلر یخ‌ساز در حالت یخ‌سازی با حداکثر ظرفیت کار می‌کند. تا زمانی که دمای سیال ورودی به زیر حد پایین از پیش تعیین شده کاهش یابد، با حداکثر ظرفیت به کار خود ادامه می‌دهد. این محدودیت نشان می‌دهد که تمام آب

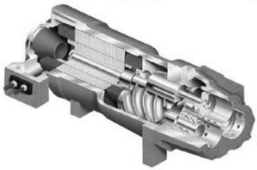
داخل مخازن یخ منجمد شده است. در حالی که یک چیلر معمولی که فقط سرمایشی است و یک چیلر یخ‌ساز ممکن است یکسان به نظر برسد، کنترل کمپرسورها (و فن‌های کندانسور، اگر چیلر با هوا خنک شود) متفاوت است.

این الگوریتم‌های کنترلی که به چیلر اجازه می‌دهند در دمای مورد نیاز بسیار پایین‌تر در حالت یخ‌سازی به‌طور قابل اعتماد کار کند، می‌توانند در صفحهٔ کنترل چیلر تعبیه شوند یا در یک کنترل‌کننده در سطح سیستم برنامه‌ریزی شوند.

تأثیر ظرفیت چیلر (با کمپرسور جابه‌جایی مثبت)

حالت عملکرد	دمای سیال خروجی	دمای مبرد	چگالی مبرد
سرمایش	40°F (4.4°C)	36°F (2.2°C)	0.972 lb/ft³ (15.6 kg/m³)
یخ‌سازی	22°F (-5.6°C)	15°F (-9.4°C)	0.640 lb/ft³ (10.2 kg/m³)

*HFC-134a





یک چیلر یخ‌ساز وقتی که در حالت یخ‌سازی کار می‌کند، ظرفیت سرمایشی کمتری نسبت به حالت سرمایشی معمولی دارد. این کاهش ظرفیت به دلیل تغییر چگالی بخار مبرد در دماهای مختلف است.

به عنوان مثال، هنگام کار در حالت سرمایش، با تولید سیال 40°F (4.4°C) ، دمای مبرد در داخل اواپراتور چیلر ممکن است 36°F (2.2°C) باشد.

در این دما، چگالی بخار اشباع مبرد HFC-134a به مقدار 0.972 lb/ft^3(15.6 kg/m^3) است. اما، در حالت یخ‌سازی، در شرایطی که چیلر سیال 22°F (-5.6°C) تولید می‌کند، دمای مبرد ممکن است 15°F (-9.4°C) باشد. در این دمای پایین‌تر، چگالی بخار مبرد به (10.2 kg/m^3) 0.640 lb/ft^3 کاهش می‌یابد.

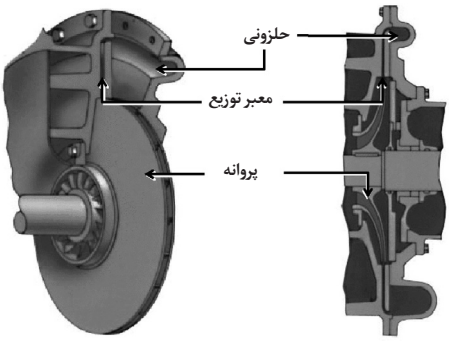
ظرفیت چیلر تابعی از دبی جرمی مبرد است که توسط

کمپرسور پمپ می‌شود.

کمپرسورهای پیچی، اسکرول و رفت و برگشتی همگی کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت هستند. این بدان معنی است که مکش یا حجم ورودی کمپرسور ثابت است. از آنجایی که حجم ثابت اســـت، وقتی چگالی مبرد کاهش می‌یابد، جرم بخار مبرد که از اواپراتور به داخل کمپرســـور مکش می‌شود کم و در نتیجه از ظرفیت نیز کاسته می‌شود.

در حالت یخ‌ســـازی، ظرفیت چیلر تقریباً به نسبت این تغییر در چگالی مبرد کاهش می‌یابد. در مثالی که در تصویر بالا نمایش داده شده اســـت، ظرفیت چیلری که در حالت یخ‌سازی کار می‌کند، تقریباً 66 درصد ظرفیت آن است که در حالت سرمایش معمولی کار می‌کند.

تأثیر ظرفیت چیلر گریز از مرکز

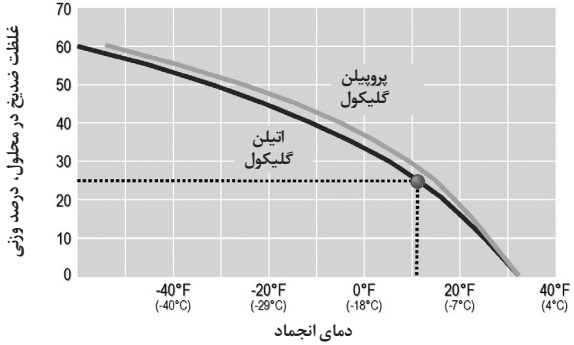


یک کمپرسور گریز از مرکز بر اساس اصل تبدیل انرژی جنبشی به انرژی ساکن عمل می‌کند تا فشار و دمای بخار مبرد را افزایش دهد.

در اینجا نیز مانند کمپرسورهای با جابه‌جایی مثبت باز هم، ظرفیت چیلر تابعی از دبی جرمی مبرد است که توسط کمپرسور پمپ می‌شود.

حداکثر دبی حجمی مبرد نیز بر حسب ft^3/min (L/s) که می‌تواند از طریق یک کمپرسور گریز از مرکز برای اندازهٔ پروانه معین، «پمپ» شود، توصیف می‌شود و از آنجایی که دبی حجمی ثابت است، با کاهش چگالی بخار مبرد، دبی جرمی مبرد که از اواپراتور به داخل کمپرسور کشیده می‌شود کاهش می‌یابد.

محلول آب- ضدیخ



سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ مبتنی بر گلیکول به یک مایع انتقال حرارت نیاز دارند که در دمای زیر نقطهٔ انجماد آب در فاز مایع باقی بماند.

به‌طور معمول، مایع انتقال حـــرارت مخلوطی از آب و ضدیخ اســـت که نقطهٔ انجماد محلـــول را کاهش می‌دهد. رایج‌ترین ضدیخ‌های مورد استفاده، اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول هستند.

محافظت در برابر یخ‌زدگی پروپیلن گلیکول اندکی کمتر از اتیلن گلیکول است. بنابراین، برای رسیدن به همان نقطهٔ انجماد، غلظت بیشتری از پروپیلن گلیکول مورد نیاز خواهد بود.

هنگام استفاده از اتیلن گلیکول، محلول آب و ضدیخ با غلظت 25 درصد (وزنی) اتیلن گلیکول منجر به کاهش نقطهٔ انجماد کافی آب می‌شـــود تا امکان عملکرد قابل اعتماد در

یک سیستم ذخیره‌سازی یخ معمولی را فراهم کند. هنگام اســـتفاده از پروپیلن گلیکول، غلظت باید 30 درصد باشد. بنابراین محلول آب-اتیلن گلیکول 75 و 25 درصد و محلول آب- پروپیلن گلیکول 70 و 30 درصد برای ســـیال اولیهٔ که موجب انجماد آب داخل مخزن می‌شود، مناسب است.

علاوه بر نقطهٔ انجماد، سایر خواص فیزیکی این سیالات انتقال حرارت نیز با آب متفاوت است.

محلول	نقطهٔ انجماد °F (0°C)	گرمای ویژه Btu/lb°F (kJ/kg°K)	ویسکوزیته cp (mPa-sec)
آب	32°F (0)	1.0 (4.2)	1.5 (1.5)
اتیلن گلیکول (25%)	11.4 (-11.7)	0.90 (3.77)	3.2 (3.2)
پروپیلن گلیکول (30%)	9.3 (-12.8)	0.92 (3.85)	5.2 (5.2)

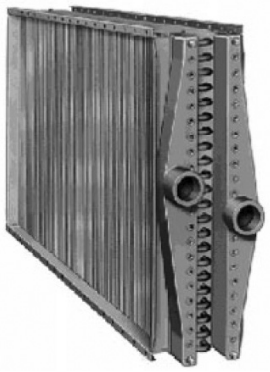
از آنجایی که گرمای ویژه پروپیلن گلیکول کمی بالاتر از اتیلن گلیکول است، به نظر می‌رسد که سرعت جریان سیال مورد نیاز با پروپیلن گلیکول اندکی کمتر باشد. اما، این ویژگی منجر به کاهش قدرت پمپاژ یا انتقال حرارت بهتر نمی‌شود، زیرا پروپیلن گلیکول ویسکوزیته بسیار بالاتری نسبت به اتیلن گلیکول دارد. این بدان معناست که سیستمی که از پروپیلن گلیکول اســـتفاده می‌کند انتقال گرمای کمتر به پمپ‌ها و کوئل‌های سرمایی بزرگ‌تری نیاز دارد.

برای اکثر سیســـتم‌های ذخیره‌سازی یخ، سیال انتقال حرارت با مخلوطـــی از 25 درصد اتیلن گلیکول و 75 درصد

آب ترجیح داده می‌شود تا محافظت در برابر یخ‌زدگی کافی را فراهم کند و تأثیر منفی بر انتقال حرارت در سایر اجزای سیستم را به حداقل برساند. اتیلن گلیکول علاوه بر این‌که یک سیال پایدار با عمر طولانی است، خورنده نیست و بنابراین برای استفاده در کوئل‌ها، لوله‌ها و اجزای چیلر مناسب و ایمن است.

برای کاربردهایی که در آنها سمی بودن یک نگرانی است (به عنوان مثال، فرآوری مواد غذایی یا داروها)، معمولاً از پروپیلن گلیکول استفاده می‌شود. از این جهت پروپیلن گلیکول مناسب‌تر است، اما دارای ویژگی‌های انتقال حرارت ضعیف در دماهای مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یخ است. بنابراین، پروپیلن گلیکول را نمی‌توان بدون مهندسی مجدد سایر اجزای سیستم جایگزین اتیلن گلیکول کرد. در این کاربردها، در نظر گرفتن گزینه‌های دیگر، مانند فرمات پتاسیم، ممکن است سودمند باشد.

تأثیر محلول آب-ضدیخ بر کوئل‌های سرمایی



محلول	دمای سیال ورودی °F (°C)	تعداد ردیف کوئل	ظرفیت کل MBh (kW)	افت فشار هوا in.w (Pa)	دبی سیال gpm (L/s)	افت فشار سیال ft.w (kPa)
آب	45 (7.2)	6	455 (133)	0.64 (160)	75.5 (4.76)	6.89 (20.6)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	395 (116)	0.62 (154)	86.4 (5.45)	7.83 (23.5)

تأثیر منفی بر انتقال حرارت که از افزودن ضدیخ به سیال انتقال حرارت حاصل می‌شود را می‌توان با بررسی عملکرد یک کوئل سرمایی نشان داد. تصویر بالا عملکرد یک نمونه کوئل سرمایی را نشان می‌دهد که شامل شش ردیف لوله با 118 fin/ft است.

این کوئل برای دبی هوای 12000cfm (5663 L/s) و ظرفیت سرمایی کل 455MBh (133 kW) انتخاب شده است.

این کوئل در صورت عدم استفاده از ضدیخ به 75.5 gpm یــا 4.76 L/s آب 45°F (7.2 °C) نیــاز دارد تا ظرفیت مورد نظر را فراهم کند. با این دبی، افت فشــار سیال در لوله‌ها 6.89 ft.w یا 20.6 kPa است.

افــزودن اتیلــن گلیکــول بــه آب، عملکــرد انتقال حــرارت این کوئل را بــه مقدار 13% کاهــش می‌دهد و به 395 MBh (116 kW) می‌رســاند و افت فشــار سیال را تا 14% افزایش می‌دهد و به 7.83 ft.w یا 20.6 kPa می‌رساند.

هر دو افت عملکرد به گرمای ویژه کمتر و ویســکوزیته بالاتر (که عــدد رینولدز را کاهش می‌دهــد) محلول آب و گلیکول نســبت داده می‌شــود. با این حال، راه‌هایی برای بازیابی بخشی از این ظرفیت از دست رفته از طریق انتخاب کوئل و طراحی سیستم وجود دارد.

محلول	دمای سیال ورودی °F (°C)	تعداد ردیف کوئل	ظرفیت کل MBh (kW)	افت فشار هوا in.w (Pa)	دبی سیال gpm (L/s)	افت فشار سیال ft.w (kPa)
آب	45 (7.2)	6	455 (133)	0.64 (160)	75.5 (4.76)	6.89 (20.6)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	395 (116)	0.62 (154)	86.4 (5.45)	7.83 (23.5)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	8	455 (133)	0.83 (208)	86.4 (5.45)	9.81 (29.3)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	455 (133)	0.65 (162)	120.7 (7.62)	14.3 (42.8)

اگر این کوئل برای نصب جدید انتخاب شود، با افزایش سطح کوئل می‌توان به ظرفیت مورد نظر دست یافت. در این مثال، افزایش تعداد ردیف‌ها از شش به هشت، ظرفیت کوئل را بـــه 455 MBh یا 133 kW مـــورد نظر برمی‌گرداند. با این حال، این رویکرد هم‌چنان افت فشار هوا را افزایش می‌دهد که موجب افزایش مصرف انرژی فن می‌شود و ممکن است نیاز به انتخاب یک موتور فن بزرگتر ناگزیر باشد. افت فشار سمت سیال را نیز افزایش می‌دهد که موجب افزایش مصرف انرژی پمپ می‌شود و ممکن است نیاز به انتخاب یک موتور بزرگتر داشته باشد.

یک رویکرد جایگزین برای دستیابی به ظرفیت مورد نظر، افزایش دبی سیال کوئل به 120.7 gpm یا 7.62 L/s است. این امر از افزایش افت فشار هوا جلوگیری می‌کند، اما منجر به افت فشار سمت سیال حتی بیشتر و مصرف انرژی پمپ، بیشتر از گزینهٔ قبلی می‌شود.

به‌طور معمول، بهترین رویکرد برای دستیابی به ظرفیت مورد نظر، کاهش دمای سیال انتقال حرارت ورودی به کوئل سرمایی است. با استفاده از کوئل اصلی، ظرفیت مورد نظر را می‌توان با کاهش دمای ســـیال ورودی از 45°F (7.2 °C) به 40°F (4.4 °C) بازیابی کرد. این گزینهٔ تأثیری بر افت فشار سمت هوا ندارد و منجر به نرخ دبی سیال کمتری نسبت به سه انتخاب قبلی می‌شود. دبی کمتر به جبران تأثیر افزودن ضدیخ به مایع انتقال حرارت، کاهش افت فشار سمت سیال و کاهش انرژی پمپاژ سیستم کمک می‌کند.

محلول	دمای سیال ورودی °F (°C)	تعداد ردیف کوئل	ظرفیت کل MBh (kW)	افت فشار هوا in.w (Pa)	دبی سیال gpm (L/s)	افت فشار سیال ft.w (kPa)
آب	45 (7.2)	6	455 (133)	0.64 (160)	75.5 (4.76)	6.89 (20.6)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	395 (116)	0.62 (154)	86.4 (5.45)	7.83 (23.5)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	8	455 (133)	0.83 (208)	86.4 (5.45)	9.81 (29.3)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	455 (133)	0.65 (162)	120.7 (7.62)	14.3 (42.8)
اتیلن گلیکول (25%)	40 (4.4)	6	455 (133)	0.64 (160)	84.1 (5.31)	7.52 (22.5)

با این حال، تولید دمای سیال سردتر باعث می‌شود چیلر بیشتر کار کند و انرژی افزون‌تری مصرف کند. نکتهٔ کلیدی ایجاد تعادل مطلوب بین این دو مورد است. ثابت شده است که کاهش دمای سیال ورودی کم‌هزینه‌ترین وسیله، هم از نظر هزینهٔ نصب و هم هزینهٔ انرژی، برای بازیابی افت ظرفیت کوئل سرمایی هنگام اســـتفاده از مایع انتقال حرارت آب و ضدیخ اســـت. و این رویکرد هم برای نصب‌های جدید و هم برای موقعیت‌های بهسازی اعمال می‌شود.

محلول	دمای سیال ورودی °F (°C)	تعداد ردیف کوئل	ظرفیت کل MBh (kW)	افت فشار هوا in.w (Pa)	دبی سیال gpm (L/s)	افت فشار سیال ft.w (kPa)
آب	45 (7.2)	6	455 (133)	0.64 (160)	75.5 (4.76)	6.89 (20.6)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	395 (116)	0.62 (154)	86.4 (5.45)	7.83 (23.5)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	8	455 (133)	0.83 (208)	86.4 (5.45)	9.81 (29.3)
اتیلن گلیکول (25%)	45 (7.2)	6	455 (133)	0.65 (162)	120.7 (7.62)	14.3 (42.8)
اتیلن گلیکول (25%)	40 (4.4)	6	455 (133)	0.64 (160)	84.1 (5.31)	7.52 (22.5)
اتیلن گلیکول (25%)	38 (3.3)	6	455 (133)	0.64 (160)	76.8 (4.22)	6.41 (19.2)

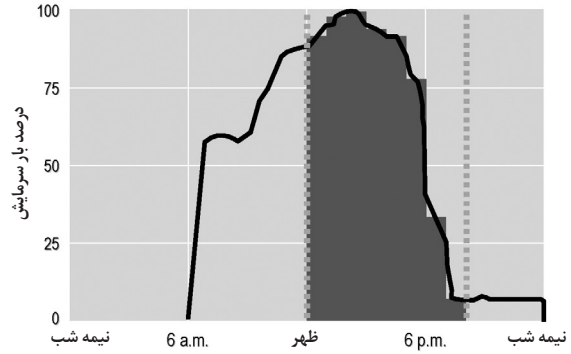
کاهش دمای سیال ورودی حتی دورتر، به 38°F (3.3 °C) در این مثال، می‌تواند مزایای بیشتری داشته باشد. بهبود عملکرد انتقال حرارت منجر به دبی سیال و افت فشار سمت سیال کمتر از انتخاب کوئل اصلی که بر اساس آب بود، شده و در واقع منجر به مصرف توان کمتر پمپ نسبت به سیستمی می‌شود که حاوی گلیکول نیست.

از طرف دیگر، دمای پایین‌تر سیال ورودی می‌تواند به

جای کاهش دبی سیال، منجر به انتخاب کوئلی با پره‌های کمتر شود که این امر هزینهٔ خرید کوئل را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر فشار افت هوا نیز کاهش می‌یابد و فن نیز با انرژی کمتری کار خواهد کرد.

در نهایت، دمای سیال ورودی سردتر، فرصتی برای کاهش دمای هوای رفت فراهم می‌کند. در مجموع اجرای سیستم‌های هوای سرد مانند کنترل‌کننده‌های هوای پایانه‌های VAV و کانال‌ها کوچکتر شده و مصرف انرژی فن نیز کم می‌شود.

تأثیر محلول آب-ضدیخ بر چیلر



از دست دادن انتقال حرارت به دلیل افزودن ضدیخ به سیال انتقال حرارت تأثیر منفی بر ظرفیت و کارایی چیلر نیز دارد. مشابهٔ کوئل سرمایی، این تأثیر نامطلوب به گرمای ویژهٔ کمتر و ویسکوزیتهٔ بالاتر سیال انتقال حرارت مربوط می‌شود.

اولین توصیه این اســـت که ضدیخی انتخاب شـــود که ویسکوزیتهٔ کمتری داشته باشـــد. همان‌طور که در جداول مبحث قبل خاطرنشـــان شد، ویســـکوزیتهٔ اتیلن گلیکول بسیار کمتر از ویســـکوزیتهٔ پروپیلن گلیکول در دمایی است که معمولاً در یک سیســـتم ذخیره یـــخ وجود دارد. توصیهٔ دوم این اســـت که غلظت ضدیخ در کمترین حد قابل قبول نگه داشـــته شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، محلول آب و ضدیخ با غلظت 25 درصد اتیلن گلیکول به‌طور کلی برای سیستم‌های ذخیره‌ســـازی یخ ترجیح داده می‌شود. هنگام استفاده از پروپیلن گلیکول، غلظت 30 درصد کافی است.

فرایند طراحی سیستم سرمایی ذخیرهٔ یخ

اولین مرحله، تشـــریح و تعریف دقیـــق وظیفهٔ انبارهٔ یخ در سیستم سرمایی است.

مرحله دوم، تعریف ظرفیت ذخیره‌ســـازی مورد نیاز با ارزیابی کاربرد خاص از نظر فضای موجود برای مخازن، تأثیر بر هزینه نصب کلی سیستم و تأثیر بر هزینهٔ چرخهٔ عمر است.

و مرحله ســـوم انتخاب مخازن ذخیره‌سازی و چیلرها است.

مرحلهٔ اول: در این مرحله پرسش‌های زیر مطرح است:

- آیا سیســـتم ذخیره‌ســـازی یخ باید به انـــدازهٔ ظرفیت ذخیره‌سازی کامل باشد یا جزئی ؟
- در صورت اســـتفاده از سیســـتم ذخیره‌ســـازی جزئی، ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه چقدر است؟
- آیا سیستم باید با روش «اصلاح اوج» طراحی شود و یا با روش «جابه‌جایی بار» ؟

قبـــل از تعیین این‌که چه مقدار ظرفیت ذخیره یخ برای یک کاربرد معین بهینه اســـت، باید درک روشنی از مزایای ذخیره‌سازی یخ برای پروژه مورد نظر وجود داشته باشد.

در برخی از تأسیســـات، توجه زیاد به یک مزیت ممکن اســـت گمراه کننده باشد و موجب حذف مزایای دیگر شود. بنابرایـــن باید مزایا و معایب با یکدیگر مقایســـه و بر مبنای نیازهای تعریف شده و شرایط خاص پروژه برخی از این مزایا که در جهت عملی کردن اهداف هستند، مد نظر قرار گیرد.

به عنوان مثال، اگر مزیت به حداقل رساندن مصرف برق در اوج (کیلووات ساعت) در اولویت باشد، سیستم ممکن است با ظرفیت ذخیره‌سازی یخ زیادی طراحی شود که هزینهٔ کلی نصب را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، اگر مزیت کاهش هزینهٔ نصب مطرح باشد، احتمالاً سیستم با ظرفیت ذخیره‌سازی کمتری طراحی خواهد شد. کوچک کردن چیلر و مشوق‌های مالی شرکت برق(اگر وجود داشته باشد) ممکن است هزینهٔ کلی نصب را کاهش دهد، اما سیستم احتمالاً به اندازهٔ یک سیستم با ظرفیت ذخیره‌سازی بیشتر، مصرف لزوماً برق در اوج را کاهش نمی‌دهد.

با این حال، احتمال تجدید نظر در آینده به دلیل تغییر نرخ برق یا استفاده از ساختمان همواره وجود دارد. طراحی خوب به سیستم اجازه می‌دهد تا پس از نصب با شرایط احتمالی آتی سازگارتر باشد.

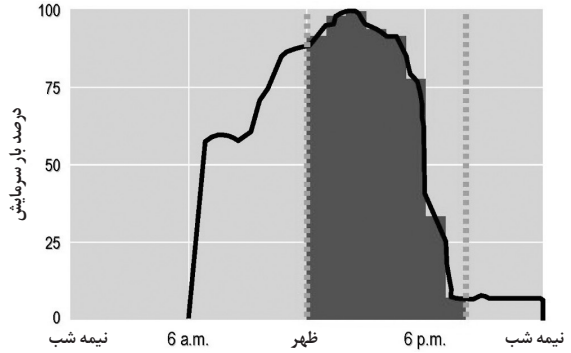
مرحلهٔ دوم: پس از این‌که وظیفهٔ سیستم ذخیره‌سازی یخ به وضوح تعریف شد، مهندس طراح می‌تواند ظرفیت کل ذخیره یخ را که به بهترین وجه پاسخگوی نیازهای تعریف شده است را تعیین کند.

ظرفیت ذخیره‌سازی تحت تأثیر فضای موجود برای مخازن، تأثیر بر هزینهٔ نصب کلی سیستم و تأثیر بر هزینهٔ چرخهٔ عمر است.

فضای محدود برای نصب ممکن است حکم کند که یک سیستم با ظرفیت ذخیره‌سازی کمتر طراحی شود، حتی اگر ظرفیت بیشتر از نظر اقتصادی توجیه داشته باشد. برای کاهش تأثیر محدودیت‌های فضا، از زیرزمین‌ها،

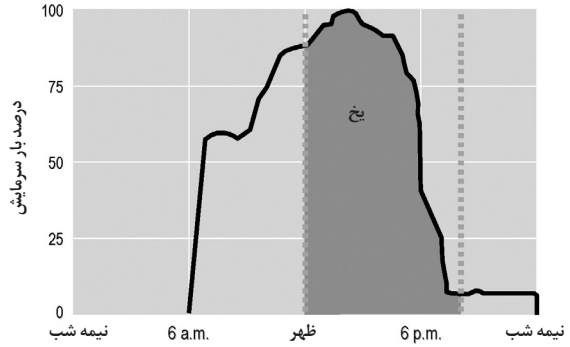
یا محوطه‌های اطراف ساختمان می‌توان استفاده کرد. سازندگان مخازن پیکربندی‌ها و انواع مختلفی را برای قرار دادن تأسیسات داخلی یا خارجی و تأسیسات روزمینی یا زیرزمینی ارائه می‌کنند.

مرحلهٔ دوم: نیازهای سرمایش در اوج مصرف



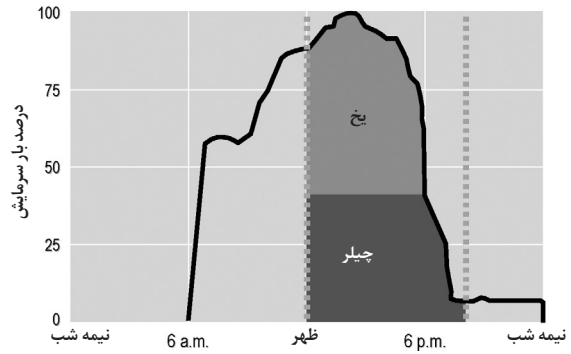
بررسی دو پروفیل بار سرمایی متفاوت هنگام تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی یخ سیستم مفید هستند. اولین مورد، مشخصات بار سرمایی بیست و چهار ساعته برای طراحی است. این بررسی برای متعادل کردن ظرفیت چیلر، نرخ انجماد مخزن، و نرخ ذوب مخزن مورد استفاده قرار می‌گیرد تا اطمینان حاصل شود که بارهای سرمایی را می‌توان برای هر ساعت از روز برآورده کرد. اگر وظیفهٔ سیستم ذخیره‌سازی یخ، کاهش مصرف انرژی در زمان اوج مصرف برق باشد، اولین قدم تعیین کل نیاز سرمایی برای دورهٔ اوج بار است. این با محاسبه بارهای سرمایی، به تن تبرید (کیلووات)، برای هر ساعت از دورهٔ اوج، و سپس جمع کردن آنها با یکدیگر تعیین می‌شود. نتیجه کل نیاز سرمایی در اوج خواهد بود که بر حسب تن-ساعت (کیلووات ساعت) بیان می‌شود.

مرحلهٔ دوم: سرمایش فقط با یخ در اوج مصرف



همان‌طور که در مباحث اولیه اشـــاره شـــد، یک رویکرد، طراحی سیســـتم ذخیره کامل با ظرفیت ذخیره‌ســـازی یخ کافی برای برآوردن کل نیاز ســـرمایی در اوج است. این امر باعث می‌شود که چیلر در طول دورهٔ اوج مصرف به‌طور کامل خاموش باشد. اما، عملاً برای اکثر تأسیسات، هزینهٔ نصب یا فضای مورد نیاز برای یک سیستم ذخیرهٔ کامل ممکن است امکان‌پذیر نباشد.

مرحلهٔ دوم: سرمایش با یخ و چیلر در اوج مصرف



در طراحی برای روز، یک سیستم ذخیره‌سازی جزئی از چیلر و مخازن یخ به صورت توأمان استفاده می‌کند تا نیاز سرمایی در اوج را برآورده کند.

چیلر با ظرفیت کم کار می‌کند و بارهای سرمایی بیشتر با ذوب یخ جبران می‌شود. اما، در روزهایی که بار کمتر است (یا بار جزئی)، سیستم ممکن است ظرفیت ذخیره‌سازی کافی را داشته باشد تا تنها با ذوب کردن یخ، کل نیاز سرمایی در اوج را جبران کند.

در تصویر بالا ، چیلر با ظرفیت ثابتی در حدود چهل درصد بار سرمایی طراحی، در طول هر ساعت از دورهٔ اوج کار می‌کند. مخازن یخ بارهای باقیمانده را برآورده می‌کنند.

اگر وظیفهٔ سیستم ذخیره‌سازی یخ این باشد که چیلر را کمتر از اندازه‌ای معین نگه دارد (چه به دلیل فضای محدود در دسترس برای نصب و چه به دلیل خدمات محدود

الکتریکـــی به ســـاختمان)، حداکثر ظرفیت براســـاس این محدودیت‌ها تعیین می‌شود. بنابراین، سیستم باید ظرفیت ذخیره‌سازی یخ کافی را برای تأمین بخشی از بارهای سرمایی که بیشتر از ظرفیت سرمایی چیلر است، داشته باشد.

مرحلهٔ دوم: تحلیل ساعتی انرژی



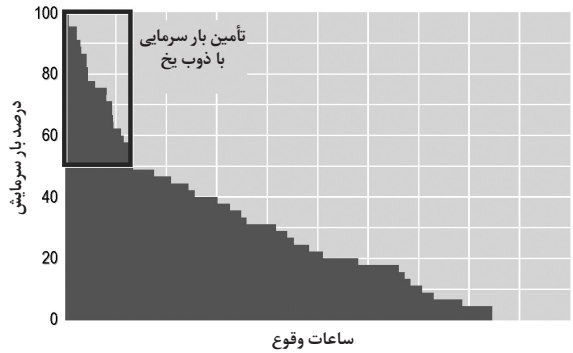
اگر وظیفهٔ سیستم ذخیره‌سازی یخ، کاهش هزینهٔ برق برای یک سرمایه‌گذاری معقول باشد، تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه در یک «سیستم ذخیره‌سازی جزئی» دشوارتر است.

برنامه‌های کامپیوتری و ساعتی آنالیز انرژی هنگام انجام تجزیه و تحلیل چرخهٔ عمر برای سیستم‌هایی با مقادیر مختلف ظرفیت ذخیره یخ بسیار مفید هستند. اما، این نوع تجزیه و تحلیل می‌تواند بسیار زمان بر باشد.

هنگامی که فضای موجود یک عامل محدود کننده نیست، و نرخ‌های الکتریکی در طول دورهٔ اول بسیار بالا است، یک سیستم با ظرفیت ذخیره‌سازی زیاد (حتی احتمالاً یک سیستم ذخیره کامل) ممکن است توجیه داشته باشد. اما، مشوق‌های مالی شرکت‌های برق(اگر وجود داشته باشد) اغلب برای توجیه یک سیستم ذخیره‌سازی کامل الزامی است.

با این حـــال، زمانی که نرخ برق کمتر اســـت، معمولاً زمانی می‌توان به بازده مالی جذابی دست یافت که ظرفیت ذخیره‌سازی یخ برابر با بیست تا چهل درصد نیاز سرمایی در دورهٔ اوج بر حسب تن ســـاعت (کیلووات ساعت) برای روز طراحی باشد.

مرحلهٔ دوم: پروفیل بار سرمایی سالانه



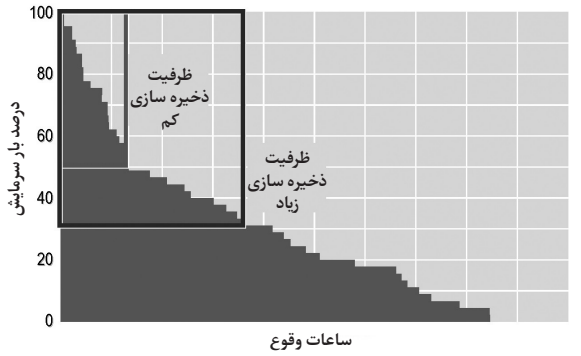
دومین نمودار بار سرمایی که برای تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی یخ مفید است، پروفیل بار سرمایی سالانه است. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه بار سرمایشی ساختمان در محور Y در طول سال تغییر می‌کند و تعداد کل ساعت‌ها در محور X هر بار رخ می‌دهد.

این نمـــودار می‌تواند برای متعـــادل کردن هزینهٔ نصب مخازن ذخیره‌سازی با صرفه‌جویی در هزینه‌های جانبی مفید باشد.

افزودن ظرفیت ذخیره‌سازی یخ بیشتر به سیستم اجازه می‌دهـــد تا با کاهـــش تقاضای(دیمانـــد) الکتریکی در اوج (کیلووات) مقدار بیشتری از بار سرمایی را برآورده کند (بسط چهارگوش روی نمودار به سمت پایین در نمودار مشخصات بار سرمایی ســـالانه). اما، این ظرفیت ذخیره‌سازی اضافی، هزینهٔ نصب را افزایش می‌دهد (مســـاحت مربع‌های داخل

چهارگوش افزایش می‌یابد و چهارگوش به سمت راست نمودار کشیده می‌شود) و به فضای بیشتری نیاز دارد.

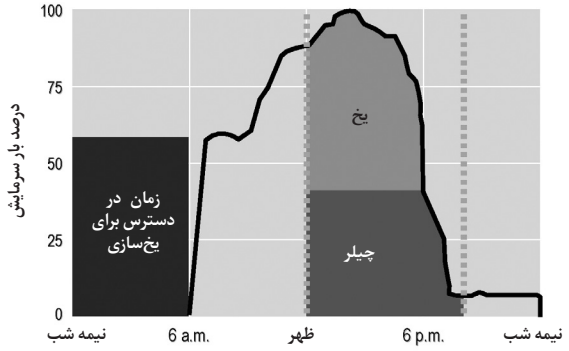
هزینهٔ نصب ذخیره‌سازی یخ اساساً خطی است. یعنی آخرین تن در ساعت (کیلووات ساعت) ظرفیت ذخیره‌سازی که به یک سیستم اضافه می‌شود به اندازهٔ اولین تن ساعت (کیلووات ساعت) ظرفیت هزینه دارد. اما، منافع مالی ظرفیت ذخیره‌سازی اضافی، خطی نیست. به عنوان مثال، اولین تن-ساعت (کیلووات ساعت) ظرفیت ذخیره‌سازی اضافه شده به سیستم ممکن است در هر روز از فصل سرمایی استفاده شود. اما آخرین تن ساعت (کیلووات ساعت) ظرفیت اضافه شده ممکن است فقط برای چند روز از سال استفاده شود. بنابراین، سود مالی اضافه کردن آخرین تن ساعت (کیلووات ساعت) ظرفیت بسیار کمتر از سود مالی اضافه کردن اولین تن ساعت (کیلووات ساعت) است. برای هر پروژه، زمانی که افزودن ظرفیت ذخیره‌سازی یخ بیشتر، دیگر توجیه اقتصادی ندارد، بازده کاهش می‌یابد.



در ابتدا، چهارگوش روی نمودار سریعتر از کشش به سمت راست به سمت پایین کشیده می‌شود، که نشان می‌دهد تقاضا در اوج سریع‌تر از افزایش هزینهٔ نصب کاهش می‌یابد.اما، با اضافه شدن ظرفیت ذخیره‌سازی بیشتر، چهارگوش شروع به کشش به سمت راست می‌کند تا این‌که به سمت پایین کشیده شود. این نشان می‌دهد که هزینهٔ نصب سریع‌تر از کاهش تقاضا در اوج افزایش می‌یابد. در این مرحله، توجیه مالی اضافه کردن ظرفیت ذخیره یخ بیش از پیش دشوار می‌شود.

این مشخصات بار سرمایی سالانه، هزینهٔ برق را نشان نمی‌دهد. ممکن است ظرفیت ذخیرهٔ یخ اضافی به دلیل نرخ بالای مصرف برق (کیلووات ساعت) یا هزینه‌های تقاضا (کیلووات) از نظر مالی توجیه‌پذیر باشد. در اینجا نیز، برنامه‌های کامپیوتری و ساعتی آنالیز انرژی هنگام تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی بهینه برای یک سیستم ذخیره‌سازی جزئی بسیار مفید هستند.

مرحلهٔ سوم: انتخاب مخزن و چیلر

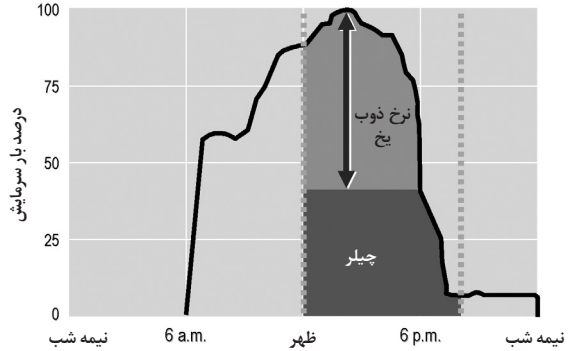


پس از تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی، مهندس طراح می‌تواند منابع ذخیره‌سازی و چیلرهای سیستم را انتخاب کند.

عوامل متعددی بر این فرآیند تأثیر می‌گذارند: نرخ انجماد و نرخ ذوب مورد نیاز مخازن، نرخ جریان سیال و دمای سیال از این موارد است.

مخازن یخ باید برای سرعت انجمادی انتخاب شوند که به اندازهٔ کافی سریع باشد تا در زمان ممکن مقدار یخ مورد نظر ساخته شود. نمودار بالا نیز نشان‌دهندهٔ حداقل نرخ انجماد است و حداقل نرخ انجماد برابر است با ظرفیت ذخیره‌سازی یخ تقسیم بر زمان ممکن برای ساخت یخ.

برای این مثال، همان‌طور که در نمودار بالا قابل مشاهده است، فقط شش ساعت (بین نیمه شب تا شش صبح) برای ساخت یخ در نظر گرفته شده است.

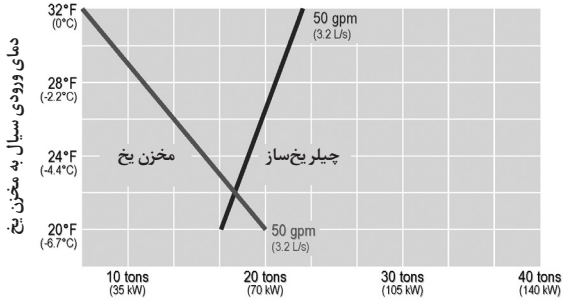


علاوه بر این، برای تعیین ظرفیت مخازن باید به سرعت ذوب نیز توجه شود تا به اندازهٔ کافی سریع باشد تا بخشی از بار سرمایی طراحی را که قرار است با ذوب یخ ذخیره شده تأمین شود، برآورده کند. حداکثر نرخ ذوب برابر است با بار سرمایی منهای ظرفیت چیلر که در آن ساعات کار می‌کند.

در این مثال و مطابق نمودار بالا ، در ساعتی که بیشترین بار سرمایی اتفاق می‌افتد، چیلر فقط ظرفیت کافی برای برآوردن حدود چهل درصد از بار سرمایی را فراهم می‌کند.

بنابراین، سرعت ذوب مخزن یخ باید به اندازهٔ کافی سریع باشد تا شصت درصد بار سرمایی طراحی را برآورده کند.

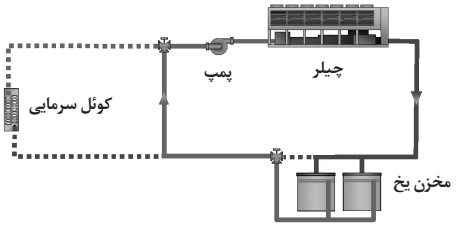
مرحلهٔ سوم: تعادل مخازن و چیلرها



تصمیمات اتخاذ شـــده هنگام انتخاب چیلرها، مخازن یخ و نرخ جریان و دما سیستم به هم مرتبط هستند. همان‌طور که پیش از این اشـــاره شد، منبع ذخیره یخ و چیلر به دبی‌های ســـیال و دماهای مختلف واکنش متفاوتی نشان می‌دهند. به عنوان مثال، همان‌طور که در تصویر بالا نشان داده شده است، دمای سیال سردتر، نرخ انجماد یک منبع ذخیره یخ را افزایش می‌دهد، اما ظرفیت یخ‌سازی چیلر را کاهش می‌دهد.

انتخاب منابع ذخیره یخ برای ســـرعت انجماد و سرعت ذوب مورد نیاز و انتخاب چیلر یخ‌ساز برای متعادل شدن با نرخ انجماد مخزن، شامل یک فرآیند مشارکتی و تکراری با اســـتفاده از نرم افزار انتخاب چیلر و نرم افزار انتخاب منبع ذخیره یخ اســـت. این فرآیند انتخـــاب مخازن و چیلرها در صورتی که با محدودیت‌های اولیه در نرخ جریان و دما تعریف نشده باشد، می‌تواند بسیار زمان‌بر باشد.

مرحلهٔ سوم: نرخ دبی سیال و اختلاف دمای انجماد

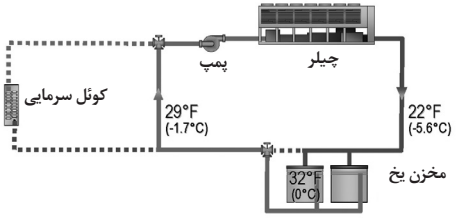


اختلاف دمای انجماد = دمای ورودی سیال به مخزن – دمای خروجی سیال از مخزن
(≃7°F = 4°C)

در طول حالت یخ‌ســـازی، منبع ذخیـــره یخ اغلب تنها باری است که توسط چیلر یخ‌ساز جبران می‌شود. بنابراین، سرعت انجماد مخزن ذخیره یخ باید با ظرفیت یخ‌سازی چیلر متعادل شود و دبی سیال چیلر و مخزن برابر است. دبی تابعی از نرخ انجماد مخزن و افزایش اختلاف دمای سیال انتقال حرارت هنگام عبور از مخزن است. این تغییر دمای سیال از ورودی به خروجی مخزن را اختلاف دمای انجماد می‌نامند.

اختلاف دمـــای انجماد کوچکتر به نرخ جریان ســـیال بالاتری برای دســـتیابی به نرخ انجماد معادل نیاز دارد. این باعث افزایش افت فشار و مصرف انرژی پمپ می‌شود. اختلاف دمای انجماد بزرگتر نیاز به دمای ســـیال سردتری دارد که وارد مخزن شـــود. این امر مستلزم آن است که چیلر سیال سردتری تولید کند که باعث کاهش ظرفیت چیلر و افزایش مصرف انرژی چیلر می‌شود. اختلاف دمای انجماد 7°F (4°C) معمولاً تعادل مطلوبی را بین این دو ایجاد می‌کند.

مرحلهٔ سوم: دمای نزدیکی مخزن



دمای نزدیکی = دمای آب داخل مخزن – دمای خروجی سیال از مخزن =(2°F -5°F =1°C - 3°C)

اگر سیال ناقل داخل مخزن آب باشد، مخزن با تغییر آب از فاز مایع به فاز جامد (یخ) گرما آزاد می‌کند.

از آنجایی که آب در دمـــای 32°F (0°C) یخ می‌زند، در طول فرآیند انجمـــاد، دمای گرم‌تری در داخل منبع ذخیره یخ وجود نخواهد داشت. دمای مایع انتقال حرارت خروجی از مخـــزن کمی ســـردتر از 32°F (0°C) خواهد بود. به این اختلاف، «دمای نزدیکی»[1] می‌گویند.

«دمای نزدیکی» برای طراحی هر مخزن و برای هر نصب متفاوت است. دستیابی به یک «دمای نزدیکی» کوچکتر به سطح انتقال حرارت بیشتری در داخل مخزن نیاز دارد. این باعث افزایش هزینه و اندازهٔ مخزن می‌شود.

یک «دمای نزدیکی» بزرگتر دمای سیال انتقال حرارت را که از مخزن خارج می‌شود، کاهش می‌دهد.

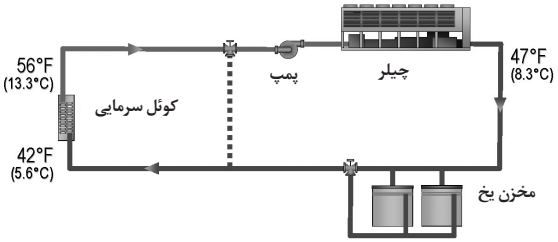
برای دستیابی به اختلاف دمای انجماد ، این امر نیازمند

1 approach

تولید سیال ســـردتر از چیلر است که مصرف انرژی چیلر را افزایش می‌دهد. یک «دمـــای نزدیکی» 2 درجه تا 5 درجه فارنهایـــت (1 درجه تا 3 درجه سلســـیوس) معمولاً تعادل مطلوبی را بین این دو ایجاد می‌کند.

در مثال نشان داده شده در تصویر بالا، «دمای نزدیکی» 3 درجه فارنهایت (1.7°C) است. بنابراین دمای سیالی که از مخزن ذخیره یخ خارج می‌شود در حالت یخ‌سازی 29 درجه فارنهایت (-1.7°C) خواهد بود. از آنجایی که اختلاف دمای انجماد برای این مثال 7 درجه فارنهایت (4 درجه سانتیگراد) است، دمای سیال وارد شده به مخزن (و در نتیجه خروج از چیلر) باید 22 درجه فارنهایت (-5.6°C) باشد.

مرحلهٔ سوم: اختلاف دمای کوئل



(14° =8°C) ≥ اختلاف دمای کوئل = دمای سیال خروجی از کوئل – دمای ورودی سیال به کوئل

وقتی که بار سرمایی ساختمان وجود دارد، سیال انتقال حرارت به کوئل‌های سرمایی پمپ می‌شود و دمای سیال با انتقال گرما از هوای گرم‌تر به سیال خنک‌تر، افزایش می‌یابد. این افزایش دما، اختلاف دمای کوئل نامیده می‌شود.

سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ معمولاً زمانی بهترین عملکرد را دارند که اختلاف دمای کوئل از 14 درجه فارنهایت (8 درجه سلسیوس) فراتر رود. کوئل با اختلاف دمای بیشتر منجر به نرخ جریان کمتری می‌شود که به جبران تأثیر افزودن ضدیخ به سیال انتقال حرارت کمک می‌کند و انرژی پمپاژ سیستم را کاهش می‌دهد.

همان‌طور که قبلا ذکر شد، در طول حالت یخ‌سازی، نرخ یخ منبع ذخیره باید با ظرفیت یخ‌سازی چیلر متعادل شود. با این حال، در طول دورهٔ اوج، سیستم ذخیره‌سازی جزئی معمولاً از ظرفیت سرمایی چیلر و یخ ذخیره‌شده برای

تأمین بارهای کوئل‌های سرمایی استفاده می‌کند.

زمانی که چیلر و مخزن به صورت ســـری با یکدیگر قرار می‌گیرند، اختلاف دما در چیلر (یا مخزن) نیازی به یکسان بودن اختلاف دمای کوئل ندارد.

در تصویر بالا، در با ســـرمایی، اختلاف دمای کوئل 14 درجه فارنهایت (8 درجه سلسیوس) است. اما، اختلاف دما در چیلر تنها 9 درجه فارنهایت (5 درجه سلسیوس) و اختلاف دما در مخزن 5 درجه فارنهایت (2.8 درجه سلسیوس) است.

انتخاب چیلر – حالت یخ ساختن



انتخاب چیلر یخ‌ســـاز به دلیل این واقعیت پیچیده است که باید در دو حالت متفاوت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد. اول سرمایش معمولی و دوم یخ ساختن.

در حالت یخ‌سازی، چیلر با حداکثر ظرفیت کار می‌کند تا عملکـــرد پایدار را تضمین کند. با توجه به کاهش چگالی مبرد، کمپرسور باید با حداکثر ظرفیت کار کند تا دبی جرمی مبرد را تا حد امکان بالا نگه دارد.

در چیلرهای دارای کمپرسورهای گریز از مرکز، این امر به جلوگیری از ناپایداری چیلر کمک می‌کند. در چیلرهای دارای کمپرســـورهای دوار-پیچی، این امر به خنک سازی مناسب روتورها کمک می‌کند. و در چیلرهای دارای کمپرســـورهای اسکرول یا رفت و برگشتی، این امر به جلوگیری از ناپایداری شیر انبساطی کمک می‌کند.

همان‌طور که قبلا اشاره شد، یک چیلر یخ‌ساز باید مجهز

به کنترلی باشد که کمپرسورها (و فن‌های کندانسور، در صورتی که چیلر با هوا خنک می‌شود) را به گونه‌ای کنترل کند که به آن اجازه دهد در هر دو حالت ایمن کار کند.

علاوه بر این، معمولاً منجمد کردن آب داخل منبع ذخیره یخ در سریع‌ترین زمان ممکن سودمند است. این امر انرژی مصرف شده توسط تجهیزات جانبی مانند پمپ‌ها، فن‌های کندانسور یا فن‌های برج خنک‌کننده را به حداقل می‌رساند.

چیلرهایی که شامل کمپرسورهای مارپیچی-دوار، اسکرول یا رفت و برگشتی هستند، معمولاً برای یخ‌سازی بدون تغییر مناسب هستند. کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت در هنگام تولید دمای سیال سردتر در حالت یخ‌سازی، دچار کاهش ظرفیت و بازدهی می‌شوند. اما، چیلر گریز از مرکز باید به‌طور خاص برای کار یخ‌سازی انتخاب شود. به دلیل تفاوت زیاد فشار مبرد بین اواپراتور و کندانسور که در حالت یخ‌سازی رخ می‌دهد، پروانه یک کمپرسور گریز از مرکز باید سرعت نوک بالاتر از حد معمول ایجاد کند. این امر احتمالاً به انتخاب پروانه‌ای با قطر بزرگتر از آن‌چه برای کار در حالت سرمایش معمولی مورد نیاز است، می‌انجامد. وقتی که چیلر در حالت سرمایش معمولی کار می‌کند، این مورد اغلب منجر به بازده کمتر از حالت بهینه می‌شود.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، دمای سیال ورودی به مخزن یخ باید نزدیک به پایان فرآیند انجماد کاهش یابد تا نرخ انجماد به همان اندازه حفظ شود. به همین دلیل، چیلر باید برای انجام وظیفه یخ‌سازی در اکثر مراحل

یخ‌ســـازی انتخاب شود و سپس بررســـی شود تا در شرایط شـــدیدتر عملکرد پایداری داشته باشد. برای تهیهٔ یخ بسیار مهم است که ظرفیت چیلر بیش از اندازه انتخاب نشود. در حالی که این یک رویهٔ رایج در سیستم‌های آب سرد معمولی است که امکان توسعهٔ آتی را پیش‌بینی می‌کنند. بزرگ کردن ظرفیت چیلر در حالت یخ‌ســـازی تعادل بین ظرفیت چیلر و نـــرخ انجماد مخزن را به هم می‌زنـــد و می‌تواند منجر به مشکلات کنترل سیستم شود.

برای جلوگیری از بزرگی بیش از حد، اولین قدم تعیین ظرفیت و کارایی چیلر در اکثر حالت یخ‌سازی، متعادل کردن آن با نرخ انجماد مخزن یخ اســـت. انتخاب باید بر اســـاس دمای متوسط ســـیال ورودی به مخزن و نیز شرایط تقطیر باشد.

برای یک چیلر با کندانسور آبی، این انتخاب باید بر اساس دمای آب ورودی کندانسور یا آب خروجی از برج خنک‌کننده باشد. باید توجه داشـــت برای عملیات یخ‌سازی چیلر و برج خنک‌کننده اغلب در شـــب کار می‌کنند و دمای مرطوب در طول شب به‌طور معمول چندین درجه کمتر از ساعات روز اســـت. این معمولاً به یک برج خنک‌کننده اجازه می‌دهد تا آب سردتر را به کندانسور یک چیلر آب خنک برساند.

برای یک چیلر با کندانســـور هوایـــی، این انتخاب باید بر اساس دمای خشـــک هوای محیط در این زمان (باز هم معمولاً در طول شـــب) باشد. دمای خشـــک در فضای باز نیز معمولاً در شـــب سردتر از روز اســـت. این به یک چیلر هوا خنک اجازه می‌دهد تا با فشـــار تراکم مبرد کمتری کار

کند. شرایط چگالش شدید برای این انتخاب را نباید در نظر گرفت. اگر نه منجر به بزرگ شـــدن ظرفیت چیلر برای کار یخ‌سازی خواهد شد.

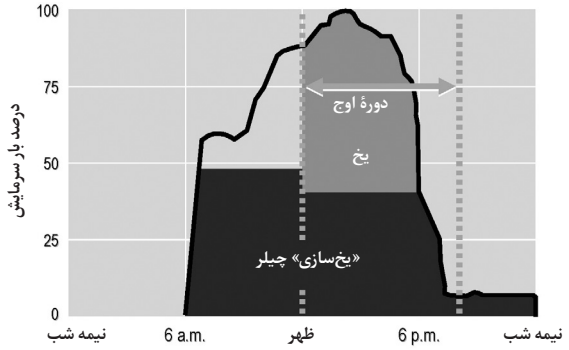
مرحله بعدی بررســـی عملکرد پایدار چیلر در شـــرایط شدیدی است که ممکن است در طول فرآیند یخ‌سازی وجود داشته باشد.

ابتدا، باید بررســـی کرد که آیا چیلر می‌تواند در نزدیکی پایان فرآیند یخ‌ســـازی، زمانی که دمای سیال سردتر تولید می‌کند، به‌طور مطمئن کار کند.

دمای نهایی ســـیال ورودی به مخزن، که معمولاً چند درجه سردتر از دمای متوسط است، معمولاً توسط سازنده مخزن یخ برای کاربرد خاص ارائه می‌شود.

دوم، باید بررســـی کرد که چیلر می‌تواند تحت شـــرایط حداکثر (یا طراحی) چگالـــش به‌طور قابل اعتماد کار کند. به‌طور معمول، دمای متوسط سیال ورودی به مخزن هنگام بررسی عملکرد در این شرایط استفاده می‌شود.

انتخاب چیلر – حالت سرمایش متعارف



پس از بررسی عملکرد چیلر انتخابی در حالت یخ‌سازی، موضوع بعدی بررسی عملکرد چیلر در حالت سرمایش معمولی یا متعارف است.

تصویر بالا نمودار درصد بار سرمایشی ساختمانی را نمایش می‌دهد که پیش از این بارها برای توضیح بسیاری مطالب مورد مثال قرار گرفته است.

ذوب یخ ذخیره‌شده در این «سیستم ذخیره‌سازی جزئی»، بخشی از نیاز خنک‌سازی در اوج را برآورده می‌کند. اما بخش قابل توجهی از نیاز سرمایشی روزانه نیز وجود دارد که باید جبران شود که نیازمند ظرفیت سرمایش اضافی است.

یکی از گزینه‌ها این است که چیلر یخ‌ساز در حالت سرمایش معمولی کار کند تا مقداری یا همه بارهای سرمایی باقیمانده را برآورده کند.

پس از انتخاب چیلر یخ‌ساز برای کار یخ‌سازی، از همان نرم‌افـــزار انتخاب چیلر برای تعیین ظرفیت ســـرمایی چیلر هنگام کار در حالت سرمایش معمولی استفاده می‌شود.

برای برخی از تأسیســـات، ممکن است به ظرفیت چیلر اضافی یا ظرفیت ذخیره‌سازی نیاز باشد. برای مثال در تصویر بالا نرخ ذوب منابع ذخیره یخ، همراه با ظرفیت سرمایی چیلر یخ‌ساز، ظرفیت سرمایی کافی برای برآوردن بارهای سرمایی در اوج را فراهم می‌کند. اما، چیلر یخ‌ساز نمی‌تواند ظرفیت سرمایی کافی برای برآوردن بارهای سرمایی باقی‌مانده در روز طراحی را فراهم کند.

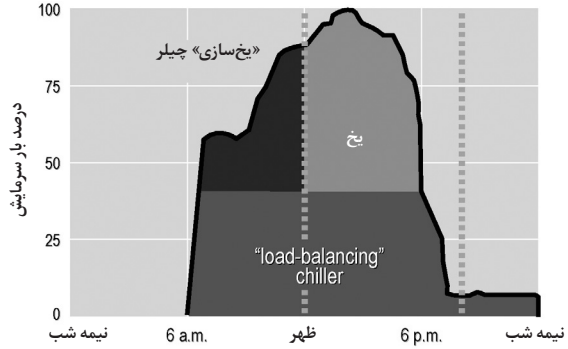
ظرفیت سرمایی اضافی برای روز

اگر کمبود ظرفیت مربوط به سرمایش متعارف بسیار اندک باشد، شـــاید این احتمال قوت گیرد که با افزایش ظرفیت چیلر یخ‌ساز کمبود ظرفیت جبران شود. اما، افزایش ظرفیت سرمایش چیلر یخ‌ساز، ظرفیت آن را در حالت یخ‌سازی نیز افزایش می‌دهد. بنابراین احتمال دیگری نیز قوت می‌گیرد و آن نیاز به افزودن ظرفیت ذخیره‌سازی برای متعادل کردن مجدد نرخ انجماد با ظرفیت یخ‌سازی چیلر است.

از سوی دیگر، اگر چیلرهای دیگری از قبل در ساختمان نصب شده باشـــند، ممکن است ظرفیت اضافی و استفاده نشده‌ای داشته باشـــند که می‌تواند برای تأمین بار سرمایی باقیمانده استفاده شود.

در نهایت این که برای تأمین بارهای ســـرمایی مورد نیاز در طول روز می‌توان چیلر دیگری به سیستم افزود. این چیلر اضافی ممکن است به عنوان چیلر « متعادل سازی- بار» یا به عنوان چیلر «پایه» انتخاب شود.

چیلر متعادل سازی - بار

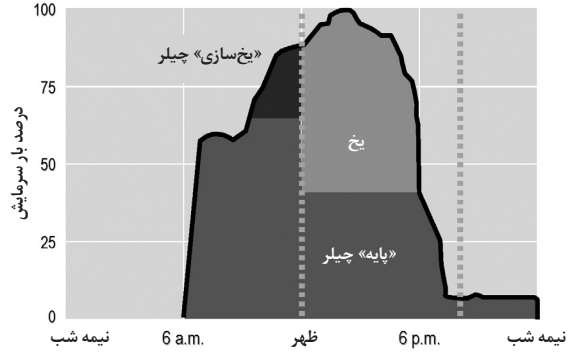


چیلر «متعادل سازی- بار» یک چیلر معمولی و فقط سرمایی اســت که ظرفیت کافی برای پاســخگویی به بخشی از بار ســرمایی را دارد که با ذوب یخ یا کار با چیلر یخ‌ســاز تأمین نمی‌شود. این رویکرد بارهای سرمایی روز را با حداقل هزینهٔ نصب جبران می‌کند. اما، با حداقل ظرفیت آماده به کار.

هنگامی که چیلر متعادل ســازی- بار از یک کمپرسور با جابه‌جایی مثبت (اسکرول، پیچی، رفت و برگشتی) استفاده می‌کند، می‌تواند به عنوان یک چیلر پشــتیبان یخ‌ســاز نیز اســتفاده شود و لزوماً نیازی نیست که ظرفیتی برابر با چیلر یخ‌ساز داشته باشد. یک چیلر کوچک‌تر «متعادل سازی- بار» می‌تواند از یک چیلر یخ‌ساز بزرگ‌تر پشتیبانی کند، اما اگر نیاز به کار در این حالت داشته باشد، یخ کمتری تولید می‌شود.

اســتفاده از چیلر «متعادل‌سازی- بار» در سیستم‌های ذخیره‌ســازی یخ کوچک‌تر که شــامل چیلرهای متعدد با کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت هستند رایج‌تر است.

چیلر پایه



چیلر «پایه» یک چیلر معمولی و فقط سرمایی است که برای برآوردن بخش بزرگ‌تری (یا همه) بارهای سرمایی روزانه و سالانه استفاده می‌شود و معمولاً به گونه‌ای انتخاب می‌شود که نسبت به چیلر یخ‌ساز که در حالت سرمایی کار می‌کند کارآمدتر باشد.

ظرفیت بزرگ‌تر چیلر «پایه» اجازه می‌دهد تا مقداری افزونگی و ظرفیت اضافی برای توسعه آینده پروژه فراهم آید.

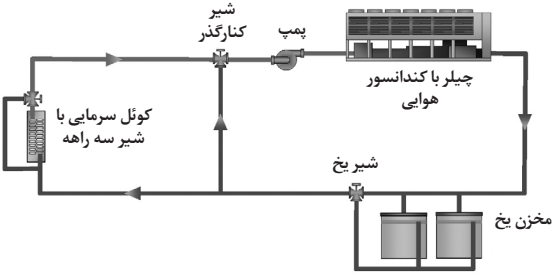
چیلر یخ‌ساز، در حالی که ممکن است به عنوان پشتیبان برای چیلر «پایه» استفاده شود، معمولاً در حالت سرمایش معمولی به ندرت کار می‌کند.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، چیلرهای گریز از مرکز انتخاب شده برای کار یخ‌سازی به سرعت نوک پروانه بالاتر از حد طبیعی نیاز دارند. این اغلب منجر به بازده کمتر از بهینه هنگام کار در حالت سرمایش معمولی می‌شود.

یک چیلـــر گریز از مرکز «پایـــه» را می‌توان برای حالت سرمایشـــی بهینه کرد (انتخاب شـــده با سرعت نوک پروانه کمتر)، که به آن اجازه می‌دهد کارایی بیشـــتری نسبت به چیلر گریز از مرکز یخ‌ساز داشته باشد.

استفاده از چیلر «پایه» در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ بزرگ‌تر که دارای چیلرهای متعدد هستند رایج‌تر است.

چیدمان یک سیستم کوچک



در سیســـتم‌های کوچکتر، چیدمان تجهیزات مشابه تصویر بالا است.

این سیستم دارای یک پمپ واحد با حجم ثابت است تا سیال ناقل را در چیلر، منابع ذخیره یخ و کوئل‌های سرمایی به گردش درآورد.

از آنجایی که این یک سیستم جریان ثابت است، ظرفیت کوئل ســـرمایی با یک شیر کنترل سه راهه تعدیل می‌شود. (برای وضوح، تنها یک کوئل ســـرمایی در تصویر نشان داده شده است.)

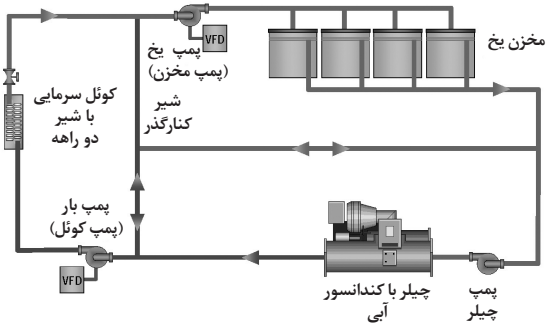
منابع ذخیره یخ به صورت ســـری با چیلر قرار گرفته‌اند و در پایین دست چیلر نصب شده‌اند. این چیدمان سری به سیستم اجازه می‌دهد تا اختلاف دمای کوئل زیاد باشد که منجر به دبی کمتر و کاهش انرژی پمپاژ می‌شود.

قرار گرفتن مخازن در پایین دســـت چیلر به سیســـتم

کنترل اجازه می‌دهد تا برای تأمین بار سرمایی ابتدا چیلر را بارگذاری کند. اگر چیلر به هر دلیلی نتواند تمام بار را تأمین کنـــد، منابع ذخیره یخ، بار باقیمانـــده را جبران می‌کنند. هم‌چنین، قرار دادن چیلر در بالادســـت این امکان را به آن می‌دهد تا وقتی که همزمـــان با مخازن کار می‌کند، دمای ســـیال خروجی گرم‌تری داشته باشـــد که منجر به افزایش ظرفیت و کارایی چیلر می‌شود.

این چیدمان دارای طراحی ساده‌ای است و کنترل‌کننده‌ها نیز ساده هســـتند. مخزن و چیلر، هر دو برای حفظ دمای ســـیال ناقل حرارت در کوئل‌های سرمایی کنترل می‌شوند. هر باری که توســـط چیلر تأمین نشود، توسط منابع ذخیره یخ تأمین می‌شود.

چیدمان یک سیستم بزرگ



با بزرگتر شدن سیستم ذخیره یخ، فرصت بهینه سازی قدرت پمپ به وجود می‌آید. از این رو در این سیستم از سه پمپ مجزا استفاده شده است که هر کدام وظیفهٔ تخصصی خود را دارند. در تصویر بالا پمپ چیلر با دبی ثابت است، اما فقط قادر است که بر افت فشار اواپراتور چیلر غلبه کند.

پمپ بار یا پمپ کوئل سرمایی دارای دبی متغیر است و قابلیت غلبه بر افت فشار کوئل یا کوئل‌های سرمایی، شیرهای کنترل و لوله‌کشی مربوط به حلقهٔ توزیع را دارد. از آنجایی که این یک سیستم جریان متغیر است، ظرفیت کوئل سرمایی با یک شیر کنترل دو راهه تعدیل می‌شود. با کاهش بار سرمایی ساختمان، پمپ کوئل دبی را کم می‌کند و در نتیجه انرژی مصرفی کاهش می‌یابد.

پمپ انبارهٔ یخ نیز از نوع دبی متغیر و تنها قادر به غلبه بر افت فشار مخازن است.

پمپ انباره دبی سیال در مخازن را تغییر می‌دهد تا قسمتی از بار سرمایش را که با ذوب یخ تأمین می‌شود، تغییر کند.

در این مثال از آرایش پمپاژ اولیه-ثانویه با یک لولهٔ کنارگذر چند منظوره استفاده شده است. این لولهٔ کنارگذر دارای سه سر است که به آن اجازه می‌دهد چیلر را از کوئل سرمایی و مخازن جدا کند. بنابراین، این لولهٔ کنارگذر جریان متعادلی را در همه زمان‌ها امکان‌پذیر می‌کند، حتی زمانی که دبی‌های مربوط به پمپ یخ، پمپ کوئل و پمپ چیلر نابرابر هستند.

این چیدمان بسیار منعطف است و امکان استفاده از چندین استراتژی کنترل را فراهم می‌کند و انرژی پمپاژ را بهینه می‌کند.

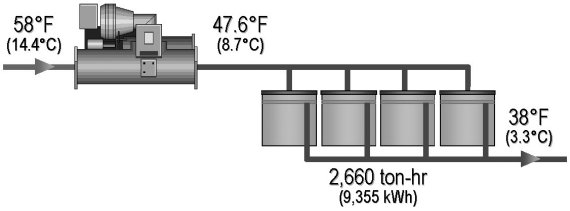
مانند سیستم کوچک که قبلاً نشان داده شد، منابع ذخیره یخ در این سیستم بزرگ نیز به صورت سری با چیلر پیکربندی شده‌اند. با این حال، برخلاف سیستم کوچک، مخازن در بالادست چیلر قرار دارند که ظرفیت ذخیره‌سازی را افزایش و هزینهٔ نصب سیستم را کاهش می‌دهد.

پائین‌دست یا بالا دست

چیلر و مخازن یخ هر دو از قرار گرفتن در بالادست سود می‌برند، جایی که گرم‌ترین سیال را از کوئل‌های سرمایی دریافت می‌کنند. برای چیلر، این سیال گرم‌تر به افزایش ظرفیت و بهبود بازده می‌انجامد. برای مخازن یخ، این میزان سیال گرم‌تر باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی می‌شود که می‌تواند تعداد مخازن مورد نیاز را کاهش دهد.

برای مثال، یک ساختمان در روز و در اوج بار، نیاز به سرمایش 8500 تن ساعت (29895 کیلووات ساعت) دارد. دبی سیستم 1200 gpm یا 75.7 L/s است و کوئل‌های سرمایی برای اختلاف دمای 20°F (11.1°C) انتخاب می‌شوند. اما، فضای محدودی در دسترس است و فقط برای نصب 20 مخزن یخ کافی است. بنابراین تحت چنین شرایطی باید استقرار مخازن در بالادست مورد بررسی قرار گیرد که در مباحث بعدی هر دو حالت قرار گرفتن مخازن در پائین‌دست و بالا دست مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مخازن یخ در پائین‌دست چیلر



در پـــی مبحث قبل، ابتدا مانند تصویر بالا، مخازن یخ را در پائین‌دست چیلر در نظر می‌گیریم.

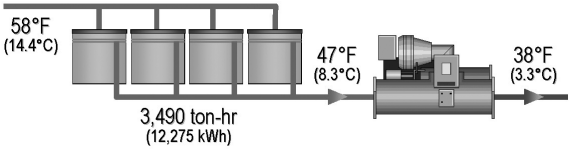
ایـــن پیکربندی به چیلر اجازه می‌دهد تا گرم‌ترین دمای سیال ورودی را دریافت کند و دمای سیال خروجی بالاتری تولید کند کـــه منجر به افزایش ظرفیت چیلر و بهبود بازده می‌شود.

در این مثال، چیلر سیال را از 58°F (14.4°C) به 47.6°F (8.7°C) بـــا بازده 0.621 کیلووات بر تن (COP 5.66) خنک می‌کند. مخازن یخ پایین دست، سیال را از 47.6°F (8.7°C) به 38°F (3.3°C) می‌رساند.

در این دماها، 20 مخزن ذخیره یخ در این مثال می‌تواند 2660 تن ساعت (9355 کیلووات ساعت) سرمایش را فراهم کند و نیاز به خنک‌کننده در اوج آن 5840 تن ساعت (20540 کیلووات ساعت) است که باید توسط چیلر برآورده شود.

اگر فرض کنیـــم چیلر با ظرفیت ثابت بـــرای دورهٔ 12 ساعته اوج، کار کند، بار ســـرمایش ساعتی که باید توسط چیلر تأمین شود 487 تن (1712 کیلووات) خواهد بود که با بازده 0.621 کیلووات بر تن یا COP 5.66 مصرف توان در اوج 302 کیلووات می‌شود.

مخازن یخ در بالا دست چیلر



در پی مبحث قبـــل و مطابق تصویر بالا اکنون مخازن را در بالادســـت چیلر در نظر می‌گیریم. این پیکربندی به مخازن اجازه می‌دهد تا گرم‌ترین دمای سیال ورودی را دریافت کنند و در دمای ســـیال خروجی بالاتـــری کار کنند که این اقدام منجر به افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی خواهد شد.

مخـــازن بالادســـت ســـیال را از 58°F (14.4°C) بـــه 47.6°F (8.7°C) می‌رســـاند. در ایـــن دماهـــای گرمتر،20 مخزن یـــخ می‌تواننـــد 3490 تن ســـاعت (12275کیلووات ساعت) ظرفیت سرمایش داشته باشند که 31 درصد ظرفیت بیشتری نســـبت به زمانی است که همین مخازن در پایین دســـت چیلر قرار داشتند. این امر نیاز سرمایی در اوج را که باید توسط چیلر برآورده شـــود به 5010 تن ساعت (17620 کیلووات ساعت) کاهش می‌دهد.

مجدداً، اگر فرض کنیم چیلر با ظرفیت ثابتی برای دورهٔ

12 ساعته اوج کار می‌کند، بار سرمایی ساعتی که باید توسط چیلر تأمین شـــود، 417.5 تن (1468 کیلووات) است. با این حال، با قرار گرفتن چیلر در پایین دســـت، باید سیال را از 47°F (8.3°C) به 38°F (3.3°C) برســـاند. این دمای سیال سردتر، بازده چیلر را به 0.673 کیلووات بر تن یا COP 5.22 کاهش می‌دهد. از آنجایی که این پیکربندی بار ســـرمایی در اوج را که باید توسط چیلر تأمین شود کاهش می‌دهد، اما، حتی اگر کارایی کمتری داشـــته باشد، مصرف برق در اوج چیلر به 281 کیلووات کاهش می‌یابد یعنی 7 درصد کمتر از زمانی که مخازن در پایین دست قرار داشتند.

البته بســـیاری از سیستم‌های ذخیره‌ســـازی یخ علاوه بر چیلر(های) یخ‌ســـاز، دارای چیلرهایی هســـتند که فقط سرمایی‌اند.

وقتی که از چیلرهای گریز از مرکز استفاده می‌شود، این چیلرهای فقط سرمایی را می‌توان برای بازدهی بالاتر نسبت به چیلر گریز از مرکز یخ‌ســـاز که در حالت سرمایش معمولی کار می‌کند انتخاب کرد که منجر به کاهش بیشتر تقاضا در اوج خواهد شد.

نتیجهٔ مثال قبل : پائین‌دست یا بالا دست

موقعیت مخازن	پائین‌دست چیلر	بالادست چیلر
ظرفیت مخزن	2660 ton-hr (9355 kWh)	3490 ton-hr (912275 kWh)
توان در اوج بار	302 kW	281 kW
تعداد مخازن	20	16

نتیجهٔ اول: قرار دادن 20 مخزن یخ در بالادست چیلر، به جای پایین دست، تقاضای الکتریکی در اوج را تا 21 کیلووات اضافی کاهش داد.

نتیجهٔ دوم: با استقرار مخازن در بالا دست، توان در اوج کاهش می‌یابد.

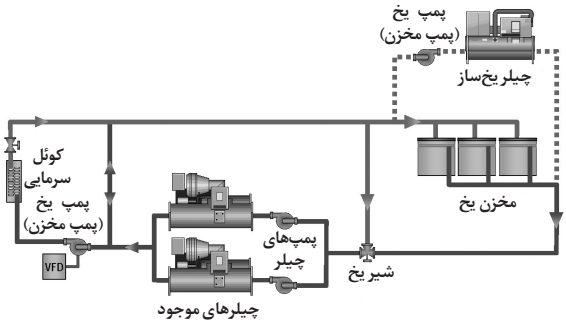
نتیجهٔ سوم: استقرار مخازن در بالادست با حفظ ظرفیت ذخیره‌سازی از تعداد آنها می‌کاهد که ضمن نیاز به جای کمتر، هزینهٔ نصب و بهره‌برداری را نیز کاهش می‌دهد.

اما فارغ از نتایج مندرج در جدول بالا باید توجه داشت که افزایش ظرفیت و کارایی ناشی از مکان چیلر در بالادست برای چیلرهایی که از کمپرسور با جابه‌جایی مثبت (دوار-پیچی، اسکرول یا رفت و برگشتی) استفاده می‌کند (که معمولاً در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ کوچک استفاده می‌شود) بیشتر از چیلرهایی که از یک کمپرسور گریز از مرکز استفاده می‌کنند، بارز است. در حالی که در سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ بزرگ که معمولاً از چیلرهایی با کمپرسورهای گریز از مرکز استفاده می‌شود، تأثیر دمای سیال سردتر بر

ظرفیت و بازده چیلرهای گریز از مرکز به اندازه چیلرهایی که از کمپرسور جابه‌جایی مثبت استفاده می‌کنند، چندان قابل توجه نیست.

بنابراین، در سیستم‌های کوچکی که از چیلرهای دوار-پیچی یا اسکرول اســـتفاده می‌کنند، بهتر است مخازن در پایین دســـت چیلرها قرار گیرند. اما در سیستم‌های بزرگی که از چیلرهای گریز از مرکز استفاده می‌کنند، بهتر هست مخازن در بالادست نصب شوند.

اصلاح سیستم موجود

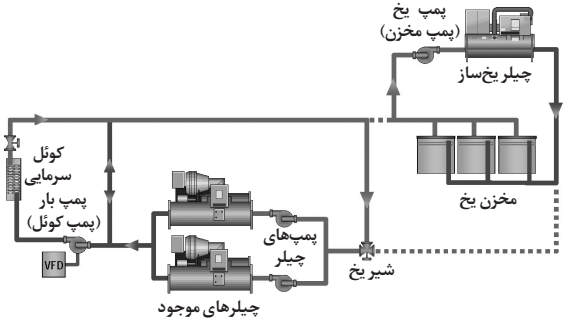


ممکن اســـت در یک سیستم موجود، چیلرهای نصب شده قـــادر به تأمین دمای ســـیال کمتر مورد نیـــاز برای حالت یخ‌سازی نباشند.

علاوه بر این، ممکن است چیلرهای گریز از مرکز موجود احتمالاً برای عملیات سرمایی معمولی انتخاب شده باشند، و متناسب‌سازی این چیلرها برای عملکرد در حالت یخ‌سازی منجـــر به از دســـت دادن قابل‌توجه بازدهـــی در زمانی که چیلر در حالت ســـرمایش معمولی کار می‌کند، می‌شود. در نتیجه، در بیشـــتر موقعیت‌های اصلاح و بهسازی، سیستم با انتخاب یک یا چند چیلر جدید، متناسب‌سازی شده برای کار یخ‌سازی، گسترش می‌یابد.

همان‌طور که در تصویر بالا نشـــان داده شـــده اســـت، مخازن یخ به صورت سری و بالادست چیلرهای فقط سرمایی موجود قرار دارند. این باعث می‌شود تا ظرفیت ذخیره‌سازی

مخازن به حداکثر برسد و چیلرهای موجود در شرایط قبلی کار کنند. وقتی که ذوب یخ مورد نظر باشـــد، «شیر یخ»[1] مقداری از سیال ناقل حرارت را که از کوئل‌های سرمایی باز می‌گردد از مخازن یخ منحرف می‌کند. سیال سرد خروجی از مخازن با بقیه آب برگشـــتی گرم مخلوط می‌شود و دمای ســـیال ورودی به چیلرهای سرمایی را کاهش می‌دهد. این به چیلرها اجازه می‌دهد تا با ظرفیت کمتر و کاهش مصرف انرژی کار کنند.



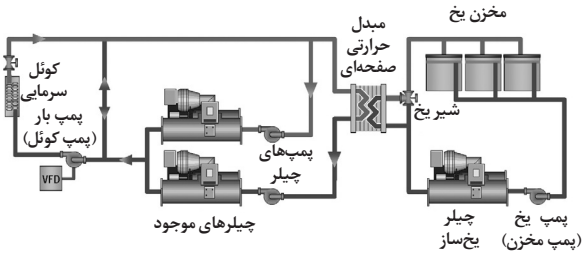
در طول دورهٔ غیر اوج، «شیر یخ» تمام سیال برگشتی از کوئل‌های سرمایی را برای کنارگذر کردن مخازن منحرف می‌کند و مخازن و چیلر یخ‌ساز را در یک حلقهٔ جداگانه قرار می‌دهد.

«پمپ یخ» ســـیال ناقل حرارت را در چیلر و مخازن یخ به گردش در می‌آورد و آب داخل مخازن را منجمد می‌کند. البته تحت این شـــرایط، سیستم نیازمند افزودن ضدیخ به سیال ناقل حرارت و پمپاژ آن در کل سیستم است.

---

1 Ice valve

مبدل حرارتی میانی



در برخی از سیســـتم‌های موجود، ممکن است بهتر باشد تا از پمپاژ محلول ضدیخ و آب در کل سیســـتم اجتناب شود. یک روش جایگزین برای محقق کردن این خواســـته، نصب یک مبدل حرارتی بین سیســـتم آب سرد موجود و سیستم ذخیره‌سازی یخ جدید است. در این وضعیت، محلول ضدیخ و آب فقـــط باید در اجزای سیســـتم جدید به گردش درآید. این روش دارای مزیت اضافی محافظت از مخازن یخ در برابر فشارهای بالا اســـت که ممکن است توسط سیستم پمپاژ موجود ایجاد شود.

باید توجه داشت که مبدل حرارتی به صورت سری با یکی از چیلرهای موجود، اما به موازات دیگری نصب می‌شود. این اجازه می‌دهد تا مبدل حرارتی تنها برای بخشی از بار سرمایی که با ذوب یخ تأمین می‌شود، اندازه‌گذاری شود، نه برای کل بار. این امر هزینهٔ نصب مبدل حرارتی را کاهش می‌دهد.

کنترل سیستم مجهز به انبارهٔ یخ

توالی کنترل برای سیســـتم ذخیره‌ســـازی یخ را می‌توان با تقسیم کنترل به دو دسته تاکتیکی و استراتژیک ساده کرد.

کنترل تاکتیکی نحوهٔ انجام یک عملکرد خاص را تعریف می‌کند. به عنوان مثال، دانستن نحوهٔ پر کردن باک بنزین خـــودرو. با این حال، کنترل اســـتراتژیک زمـــان انجام آن عملکرد را مشخص می‌کند. به عنوان مثال، دانستن زمان پر کردن باک بنزین.

عملکرد	جزء اول	جزء دوم	جزء سوم
حالت اول	واکنش	واکنش	واکنش
حالت دوم	واکنش	واکنش	واکنش
حالت سوم	واکنش	واکنش	واکنش

ســـاخت جدولی مانند جدول بالا می‌تواند به شناسایی تمام اقدامات لازم برای انجام یک عملکرد خاص کمک کند.

در زیر ســـتون با عنوان «عملکرد»، حالت‌های عملیاتی مختلف برای سیســـتم ذخیره‌سازی یخ فهرست شده است. از ستون‌های باقی‌مانده برای تعریف عملکرد اجزای سیستم (پمپ‌ها، شیرها، چیلرها و غیره) استفاده می‌شود. این جدول برای توصیف عملکردی کـــه هر جزء باید در طول هر یک از حالت‌های عملیاتی سیســـتم انجام دهد استفاده می‌شود. بدیهی است که ستون‌ها و ردیف‌های این جدول متناسب با نوع و اجزای سیستم قابلیت گسترده‌تر شدن دارد.

اولیـــن گام در تعییـــن تاکتیک کنترل این اســـت که حالت‌های عملیاتی سیســـتم ذخیره‌سازی یخ تعریف شود. برای ادامهٔ این بحث شش حالت عملیاتی در نظر گرفته شده است، که عبارتند از:

۱) فراهم کردن سرمایش فقط با چیلر. (فقط چیلر)
معمولاً اوقاتی در طول روز و چندین روز در طول سال وجود دارد که نرخ برق به اندازه‌ای پایین است که کارکردن چیلر به تنهایی اقتصادی‌ترین وسیله برای برآورده کردن بار سرمایی است. در این حالت عملیاتی، سیستم باید بتواند بار سرمایی را بدون ذوب شدن یخ تأمین کند.

۲) خنک‌سازی فقط با یخ. (فقط یخ)
بیشترین کاهش در تقاضای الکتریکی در حالی رخ می‌دهد که چیلر به دلیل اوج مصرف برق(کیلووات ساعت) یا تقاضای زیاد(کیلووات) خاموش است و بار سرمایی صرفاً با ذوب یخ ذخیره شده تأمین می‌شود. این حالت ممکن است مقرون به صرفه‌ترین وسیله برای جبران بار سرمایی باشد. در این حالت عملیاتی، سیســـتم باید بتواند کل بار سرمایی را با ذوب یخ ذخیره شده بدون نیاز به کارکرد چیلر تأمین کند.

۳) فراهم کردن سرمایش با چیلر و یخ. (چیلر و یخ)
در برخی موارد، ممکن اســـت ساعاتی در طول روز باشد که بار سرمایی از ظرفیت چیلر یا سرعت ذوب مخازن یخ بیشتر شـــود. بنابراین هر دو باید به‌طـــور همزمان برای جبران بار اســـتفاده شوند. در این حالت عملیاتی، سیستم باید بتواند بار سرمایی را با استفاده از چیلر توأم با ذوب یخ ذخیره شده تأمین کند.

۴) مخازن یخ منجمد. (انجماد)
هنگامی که نرخ برق کم اســت، چیلر در حالت یخ‌ســازی کار می‌کند تــا آب داخل مخازن یخ را منجمد کند. در این حالت عملیاتی، چیلر سیال با دمای پایین تولید می‌کند که در مخازن به گردش در می‌آید و آب ذخیره شــده در داخل مخازن را منجمد می‌کند.

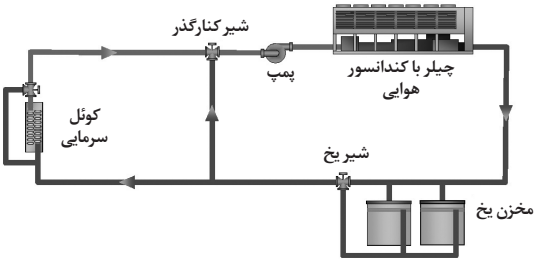
۵) انجماد توأم با سرمایش. (انجماد و سرمایش)
گاهی اوقات ممکن اســت لازم باشــد آب داخل مخازن در حالی که بار سرمایش ســاختمان هنوز وجود دارد منجمد شود. در این حالت عملیاتی، سیستم باید بتواند همزمان با یخ زدن آب ذخیره شده در مخازن، بار سرمایشی ساختمان را هم جبران کند.

۶) سیستم خاموش. (خاموش)
هنگامی کــه تمام آب داخــل مخازن یخ زده اســت و بار سرمایش ساختمان وجود ندارد، چیلر و پمپ‌ها را می‌توان برای صرفه‌جویی در انرژی خاموش کرد.

براســاس عملکردهای شــش‌گانه بالا جدول تاکتیک کنترل به شکل زیر در خواهد آمد:

عملکرد	جزء اول	جزء دوم	جزء سوم	جزء چهارم
فقط چیلر				
فقط یخ				
چیلر و یخ				
انجماد				
انجماد و سرمایش				
خاموش				

شناسایی اجزای کنترل شده



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
حالت				

تصویر بالا نمونه‌ای از یک سیستم کوچک ذخیره‌سازی یخ است که پیش از این هم به آن اشاره شده بود.

مخازن یخ به صورت سری با چیلر و در پایین دست چیلر قرار گرفته‌اند. این سیستم از یک پمپ واحد با حجم ثابت برای گردش سیال ناقل حرارت در چیلر، مخازن یخ و کوئل‌های سرمایشی استفاده می‌کند.

چیلر شامل یک کنترل‌کننده است که به آن اجازه می‌دهد در حالت سرمایش متعارف و هم‌چنین در حالت یخ‌سازی کار کند.

سرعت ذوب شدن یخ را می‌توان با استفاده از یک «شیر یخ» تعدیل‌کنندهٔ سه راهه تغییر داد که سیال سرد خروجی مخازن را با سیال گرم‌تر که مخازن را دور می‌زند مخلوط

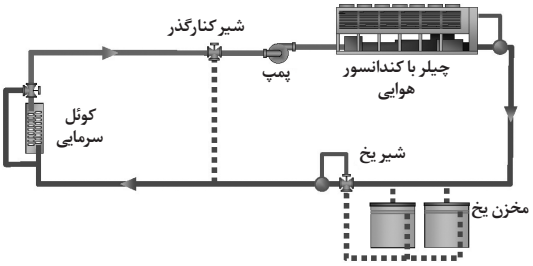
می‌کند.

یک شـــیر کنارگذر دو حالته به سیال خروجی از مخازن اجازه می‌دهد که یا به کوئل‌های ســـرمایی برود و یا به‌طور مستقیم به چیلر بازگردد.

اجزای کنترل شده برای این سیستم ذخیره یخ کوچک عبارتنـــد از: پمپ، چیلر، شـــیر یخ و شـــیر کنارگذر که در جدول بالا با پر شدن عناوین، ستون‌های جدول را به خود اختصاص داده‌اند.

مرحلهٔ نهایی، شناسایی اقدامات مورد نیاز هر جزء کنترل شده در طول هر یک از حالت‌های عملیاتی سیستم است که در مبحث بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.

شناسایی اجزای کنترل‌شده و حالت «فقط چیلر»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
فقط چیلر	روشن	45°F (7.2°C)	55°F (12.8°C)	سمت بار

اولین حالت عملیاتی فراهم کردن سرمایش با استفاده از چیلر به تنهایی است. این امر مستلزم روشن شدن پمپ است تا سیال ناقل حرارت را در سراسر سیستم به گردش درآورد.

به منظور جبران بار سرمایش، چیلر نیز باید در حال کار باشد و دمای رفت مورد نظر سیستم را تأمین کند.. در این مثال، نقطهٔ تنظیم دمای رفت 45°F یا 7.2°C است.

«شیر یخ» یک شیر ترکیبی است که سیال سرد از مخازن را با سیال گرم‌تر که مخازن را دور می‌زند مخلوط می‌کند تا به دمای مطلوب در پایین دست شیر برسد.

اگر دمای سیال پایین‌دست شیر یخ کمتر از نقطهٔ تنظیم

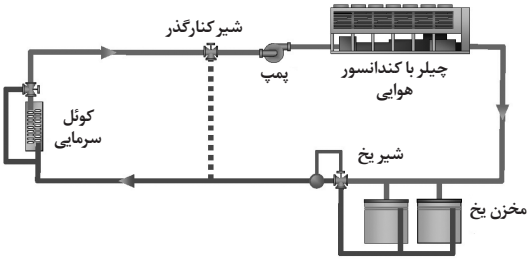
شیر یخ باشد، این شیر ترکیبی جریان سیال سردتر را که از مخازن می‌آید کاهش می‌دهد و جریان سیال گرم‌تر را در دور زدن مخازن افزایش می‌دهد و در نتیجه دمای پایین دست افزایش می‌یابد.

در این حالت کار، نقطهٔ تنظیم برای شیر یخ به 55°F یا 12.8°C افزایش می‌یابد. از آنجایی که سیال خروجی چیلر دارای دمای 45°F یا 7.2°C است، که سردتر از نقطهٔ تنظیم شیر یخ است، این شیر طوری تنظیم می‌شود که هیچ سیالی از مخازن یخ عبور نکند. این امر از ذوب شدن یخ در این حالت کارکرد جلوگیری می‌کند.

در نهایت، شیر کنارگذر طوری قرار می‌گیرد که سیال ناقل سرد را به سمت کوئل‌های سرمایی (بار) هدایت کند.

در جدول بالا خلاصه‌ای از حالت «فقط چیلر» آمده است.

حالت «فقط یخ»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
فقط یخ	روشن	خاموش	45°F (7.2°C)	سمت بار

حالت دوم عملیاتی این اســت که تنهــا با ذوب یخ باید بار سرمایش جبران شود.

در این حالت نیز پمپ روشــن می‌شــود تا سیال ناقل حرارت را به گردش درآورد. اما، چیلر خاموش اســت، زیرا قرار است مخازن یخ تنها تأمین‌کنندهٔ سرمایش باشند.

نقطهٔ تنظیم برای شــیر یخ روی دمــای 45°F یا 7.2°C تنظیم می‌شود که دمای سیال رفت سیستم است.

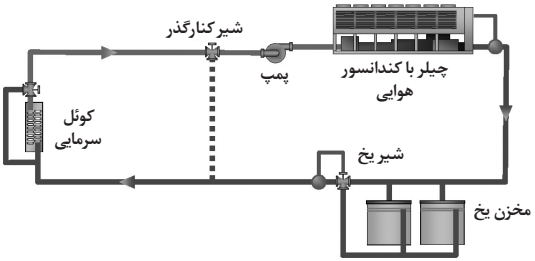
از آنجایی که چیلر خاموش است، دمای سیال عبوری از مخازن، گرم‌تر از نقطهٔ تنظیم شیر است. بنابراین، شیر یخ، سیال سردی را که از مخازن یخ می‌آید را با این سیال گرم‌تر که مخازن را دور می‌زند مخلوط می‌کند تا دمای سیال 45°F

یا 7.2°C مورد نظر در پایین دست شیر یخ به دست آید.

در نهایت، شـــیر کنارگذر طوری قرار می‌گیرد که سیال سرد را به سمت کوئل‌های سرمایی هدایت کند.

در جدول بالا خلاصه‌ای از حالت «فقط یخ» آمده است.

حالت «چیلر و یخ»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
چیلر و یخ	روشن	45°F (7.2°C)	45°F (7.2°C)	سمت بار

سومین حالت کار این است که با کارکردن چیلر و ذوب یخ به‌طور همزمان، بار سرمایی جبران شود. در این راستا مجدداً پمپ روشن می‌شود و شیر کنارگذر در حالت هدایت سیال سرد به سمت کوئل‌های سرمایی قرار می‌گیرد.

در همین حال چیلر روشن و نقطهٔ تنظیم آن روی 45°F یا 7.2°C تنظیم شده است. نقطهٔ تنظیم برای شیر یخ نیز روی 45°F یا 7.2°C تنظیم شده است. در این حالت عملیاتی، چیلر و مخازن یخ با هم کار می‌کنند تا دمای سیال رفت سیستم را تأمین کنند.

از آنجایی که چیلر با مخازن یخ سری است و در بالادست آن قرار دارد، ترجیحاً ابتدا چیلر بارگذاری می‌شود. این بدان

معنی اســـت که اولین فرصت به چیلر داده می‌شـــود تا بار سرمایی را جبران کند.

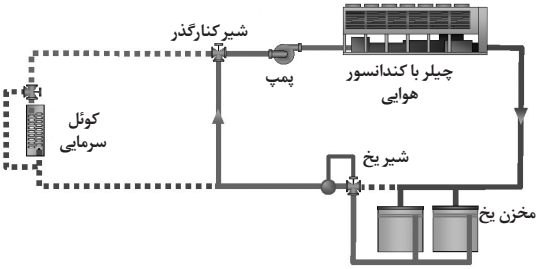
اگر چیلر ظرفیت کافی برای خنک کردن سیال تا نقطهٔ تنظیم 45°F یا 7.2°C را داشته باشد، نقطهٔ تنظیم شیر یخ برآورده می‌شود و هیچ سیالی از مخازن یخ جریان نمی‌یابد. اما، اگر چیلر ظرفیت کافی نداشته باشد و فقط بتواند سیال را تا دمای 50°F یا 10°C خنک کند، مخازن یخ، باقیمانده بار سرمایی را جبران می‌کنند.

شیر یخ، سیال سردی را که از مخازن یخ می‌آید را با این ســـیال 50°F یا 10°C چیلر مخلوط می‌کند تا دمای سیال به 45°F یا 7.2°C مورد نظر در پایین دست شیر یخ برسد.

سیســـتم کنترل را می‌توان برای تنظیم بخشـــی از بار سرمایی که توسط چیلر تأمین می‌شـــود و بنابراین سرعت ذوب یـــخ را تنظیم کرد. محدود کردن ظرفیت چیلر، چه از طریـــق محدود کردن تقاضا یا با افزایش نقطهٔ تنظیم چیلر، بخشی از بار سرمایی را که با ذوب یخ تأمین می‌شود، افزایش می‌دهد.

در جـــدول بالا خلاصه‌ای از حالـــت «چیلر و یخ» آمده است.

حالت «انجماد»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
انجماد	روشن	یخ‌سازی	15°F (-9.4°C)	سمت چیلر

حالت چهارم عملیات انجماد آب داخل مخازن یخ است.

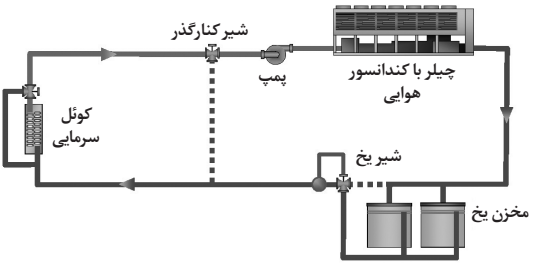
در این حالت نیز پمپ برای گردش سیال ناقل حرارت روشن می‌شود.

در این حالت عملیاتی، چون بار سرمایی ساختمان وجود ندارد، شیر کنارگذر طوری قرار می‌گیرد که سیال سرد را به سمت چیلر هدایت کند و کوئل‌های سرمایی را دور بزند.

چیلر در حالت یخ‌سازی روشن می‌شود. در این حالت، چیلر با ظرفیت سرمایشی کامل کار می‌کند و دمای سیال خروجی خود را بین 20°F(-6.7°C) تا 25°F(-3.9°C) کاهش می‌دهد. این دما به اندازه‌ای هست که آب داخل مخازن منجمد شود.

در ایـــن حالت عملکرد، نقطهٔ تنظیم برای شـــیر یخ به 15°F(-9.4°C) کاهش می‌یابد. از آنجایی که دمای ســـیالی که از چیلر خارج می‌شـــود گرم‌تر از نقطهٔ تنظیم شیر است، شـــیر یخ طوری تنظیم می‌شود که تمام سیال از مخازن یخ عبور کند و هیچ‌کدام دور زده نمی‌شوند. این اجازه می‌دهد تا آب داخل مخازن یخ در سریع‌ترین زمان ممکن منجمد شود.

حالت «انجماد و سرمایش»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
انجماد و سرمایش	روشن	یخ‌سازی	15°F (-9.4°C)	سمت بار

پنجمین حالـــت عملیاتی منجمد کـــردن آب در مخازن و جبران بار سرمایی همزمان ساختمان است.

در این حالت هم پمپ روشن می‌شود و مانند حالت کار قبلی، چیلر در حالت یخ‌ســـازی کار می‌کند و نقطهٔ تنظیم برای شـــیر یخ (15°F(-9.4°C اســـت. مجدداً، این منجر به گردش تمام ســـیال در مخـــازن و انجماد آب داخل مخازن می‌شود.

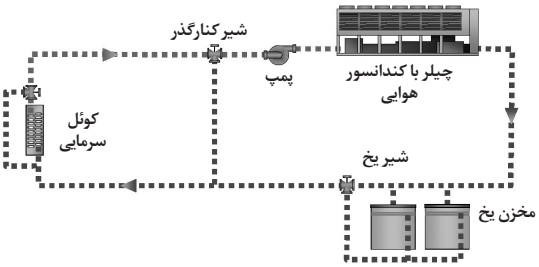
اما، در این حالت عملیاتی، به دلیل وجود بار ســـرمایی همزمان ساختمان، شیر کنارگذر برای هدایت سیال سرد به سمت کوئل‌های سرمایی (بار) قرار می‌گیرد.

در این پیکربندی سری، سیال سرد چیلر ابتدا از مخازن

یخ عبور می‌کند تا آب داخل مخازن منجمد شـــود. سپس ســـیال از کوئل‌های ســـرمایی عبور می‌کند تا بار ســـرمایی ساختمان را تأمین کند.

در این حالت عملیاتی «انجماد و ســـرمایش»، سیال با دمای گرم‌تری نسبت به حالت عملیاتی «انجماد» به چیلر باز می‌گردد، زیرا گرما به سیال داخل کوئل‌های سرمایی منتقل می‌شود. بنابراین، سیال، چیلر را که هنوز با ظرفیت کامل کار می‌کند، در دمایی گرم‌تر از زمانی که سیســـتم در حالت کارکرد «انجماد» بود، ترک می‌کند. نتیجه این اســـت که وقتی سیستم بار سرمایی ساختمان را برآورده می‌کند، مدت زمان بیشتری طول می‌کشـــد تا آب داخل مخازن منجمد شود.

حالت «خاموش»



عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
خاموش	خاموش	خاموش	-	-

حالـــت عملیاتی نهایـــی، خاموش کردن سیســـتم، زمانی اســـتفاده می‌شود که بار سرمایی ســـاختمان وجود نداشته باشد و تمام آب داخل مخازن نیز منجمد شده باشد.

پمپ و چیلر هر دو خاموش هستند. از آنجایی که جریان سیال وجود ندارد و موقعیت شیر یخ و شیر کنارگذر اهمیتی نخواهد داشت.

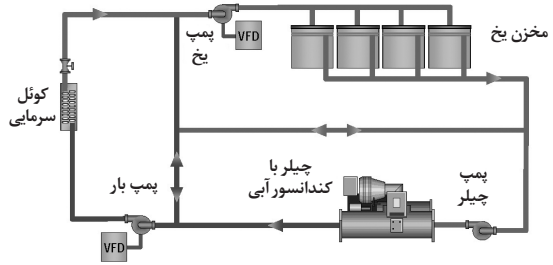
جدول کامل شدهٔ کنترل تاکتیکی

عملکرد	پمپ	چیلر	شیر یخ	شیر کنارگذر
فقط چیلر	روشن	45°F (7.2°C)	55°F (12.8°C)	سمت بار
فقط یخ	روشن	خاموش	45°F (7.2°C)	سمت بار
چیلر و یخ	روشن	45°F (7.2°C)	45°F (7.2°C)	سمت بار
انجماد	روشن	یخ‌سازی	15°F (-9.4°C)	سمت چیلر
انجماد و سرمایش	روشن	یخ‌سازی	15°F (-9.4°C)	سمت بار
خاموش	خاموش	خاموش	-	-

جدول بالا، کنترل تاکتیکی تکمیل شده برای یک سیستم ذخیره‌سازی کوچک یخ مورد مثال را نشان می‌دهد که نحوهٔ هر عملکرد (حالت عملیاتی) را با شناسایی اقدامات مورد نیاز هر جزء کنترل شده (پمپ، چیلر، شیر یخ و شیر کنارگذر) در طی هر یک از شش حالت عملیاتی شرح می‌دهد.

ارزیابی هر یک از این حالت‌های عملیاتی، و ابداع سیستمی که به‌طور مؤثر در هر حالت عمل می‌کند، برای حصول اطمینان از صحت کار یک سیستم کوچک و ساده ذخیره‌سازی یخ ضروری است.

شناسایی اجزای یک سیستم انبارهٔ یخ بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
حالت				

تصویر بالا، نمونه‌ای از یک سیستم بزرگ ذخیره‌سازی یخ است که پیش از این هم به آن اشاره شده بود.

مخازن یخ مجدداً به صورت سری با چیلر پیکربندی شده‌اند، اما در این مثال، آنها در بالادست چیلر قرار دارند.

این سیستم از سه پمپ مجزا استفاده می‌کند که هر کدام برای وظیفه‌ای که انجام می‌دهند بهینه شده‌اند. «پمپ بار» با دبی متغیر سیال ناقل حرارت را به سمت کوئل‌های سرمایی به گردش در می‌آورد و ظرفیت کوئل را برای پاسخگویی به بار سرمایی در حال تغییر ساختمان را تغییر می‌دهد.

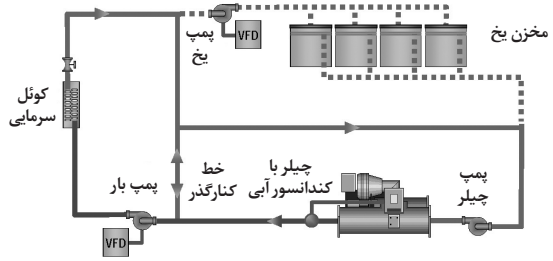
«پمپ چیلر» با دبی ثابت سیال را در چیلر به گردش در می‌آورد.

«پمپ یخ» با دبی متغیر سیال را در مخازن یخ به گردش در می‌آورد و ظرفیت آن را برای تنظیم بخشی از بار سرمایی که با ذوب یخ تأمین می‌شـــود، تغییر می‌دهد. لولهٔ کنارگذر جریان متعادلی را در همه زمان‌ها امکان‌پذیر می‌کند، حتی زمانی که دبی این سه پمپ نابرابر است.

اجزای کنترل شده برای این سیستم بزرگ ذخیره‌سازی یخ عبارتند از: پمپ بار، پمپ چیلر، پمپ یخ و چیلر.

با پر شـــدن عناوین ســـتون‌های جدول، مرحله نهایی شناسایی اقدامات مورد نیاز هر جزء کنترل شده در طول هر یک از شش حالت عملیاتی مشخص می‌شود.

حالت «فقط چیلر» در سیستم بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
فقط چیلر	روشن	روشن	خاموش	42°F (5.6°C)

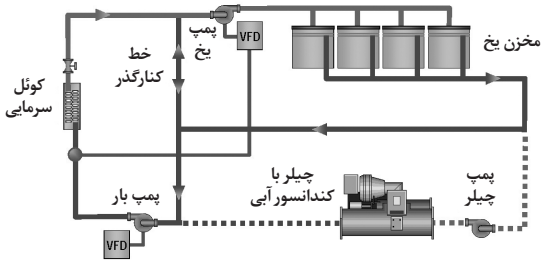
اولین حالت عملیاتی فراهم کردن سرمایش با استفاده از چیلر به تنهایی است. این امر مستلزم روشن شدن «پمپ بار» است و مقدار مناسبی از سیال ناقل حرارت مورد نیاز برای برآوردن نیازهای جریان کوئل‌های سرمایی با شیرهای کنترل دو راهه را به گردش در می‌آورد.

برای این‌که چیلر بتواند بار سرمایی را جبران کند، هم «پمپ چیلر» و هم چیلر باید روشن باشند و نقطهٔ تنظیم چیلر با دمای رفت مورد نظر سیستم تنظیم شود. برای این مثال، آن نقطهٔ تنظیم 42°F یا 5.6°C است.

«پمپ یخ» برای جلوگیری از ذوب شدن یخ خاموش است.

در ایـــن حالـــت عملیاتی، لولـــهٔ کنارگذر بـــه صورت هیدرولیکـــی «پمپ بار» با دبی متغیـــر را از «پمپ چیلر» با دبـــی ثابت جدا می‌کند و عملکرد این دو پمپ مانند یک سیستم اولیه-ثانویه است.

حالت «فقط یخ» در سیستم بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
فقط یخ	روشن	خاموش	42°F (5.6°C)	خاموش

حالت دوم عملیاتی این اســـت که با ذوب یخ به تنهایی بار سرمایی جبران شود. مجدداً، «پمپ بار» روشن می‌شود تا سیال ناقل حرارت را در کوئل‌های سرمایی به گردش درآورد. «پمپ چیلر» و چیلر هر دو خاموش هستند زیرا مخازن یخ تنها تأمین‌کننده بار سرمایی هستند.

«پمپ یخ» روشـــن می‌شود و سیال را در مخازن یخ به گردش در می‌آورد.

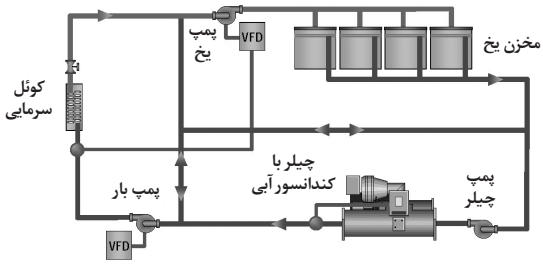
لولهٔ کنارگـــذر به صورت هیدرولیکی «پمپ بار» با دبی متغیر را از «پمپ یخ» با دبی متغیر جدا می‌کند.

دبی پمپ بار برای تأمین جریان مورد نیاز برای جبران بار کوئل‌های سرمایی تعدیل می‌شود.

دمای سیال ارسالی به کوئل‌های سرمایی توسط سیستم کنترل نظارت می‌شـــود. اگر این دمـــا از 42°F یا 5.6°C که دمای ســـیال رفت سیستم است، افزایش یابد، دبی «پمپ یخ» افزایش می‌یابد و در نتیجه ســـیال ســـرد بیشـــتری از مخازن یخ با ســـیال گرم‌تر بازگشـــته از کوئل‌های سرمایی مخلوط می‌شود.

برعکس، اگر دمای سیالی که به بیرون فرستاده می‌شود بـــه کمتر از 42°F یا 5.6°C برســـد، دبی «پمپ یخ» کاهش می‌یابد و در نتیجه سیال ســـرد کمتری از مخازن با سیال گرم‌تری که از مخزن بازمی‌گردد مخلوط می‌شود.

حالت «چیلر و یخ» در سیستم بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
چیلر و یخ	روشن	روشن	42°F (5.6°C)	42°F (5.6°C)

سومین حالت عملیاتی، فراهم کردن سرمایش با کارکردن همزمان چیلر و ذوب یخ است.

در این حالت عملیاتی، هر سه پمپ روشن می‌شوند. چیلر نیز روشن است و نقطهٔ تنظیم آن روی 42°F یا 5.6°C تنظیم شده است.

مشابه حالت کار قبلی، سرعت «پمپ یخ» برای حفظ دمای سیال رفت سیستم در 42°F یا 5.6°C کنترل می‌شود.

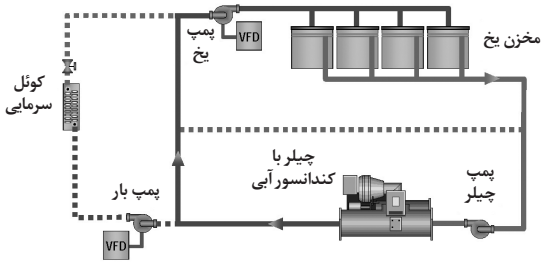
اگر چیلر ظرفیت کافی برای خنک کردن سیال تا دمای 42°F یا 5.6°C را داشته باشد، نقطهٔ تنظیم «پمپ یخ» برآورده می‌شود و هیچ سیالی از مخازن عبور نمی‌کند. اما، اگر چیلر ظرفیت کافی نداشته باشد و برای مثال، فقط

بتواند سیال را تا 46°F یا 7.8°C خنک کند، دبی «پمپ یخ» افزایش می‌یابد تا باقیمانده بار سرمایی را جبران کند.

سیستم کنترل می‌تواند برای تنظیم بخشی از بار سرمایی که توسط چیلر تأمین می‌شـــود، سرعت ذوب یخ را تنظیم کند.

محدود کردن ظرفیت چیلر، چه از طریق محدود کردن تقاضا یا افزایش نقطهٔ تنظیم چیلر، بخشی از بار سرمایی را که با ذوب یخ تأمین می‌شود، افزایش می‌دهد.

حالت «انجماد» در سیستم بزرگ

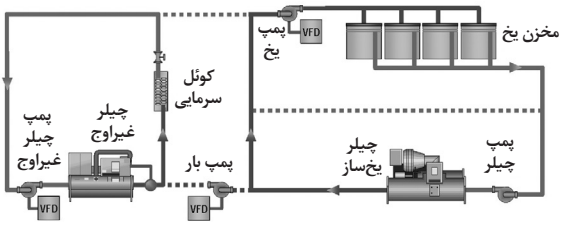


عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
انجماد	خاموش	روشن	یکسان با پمپ چیلر	یخ‌سازی

حالت چهارم، عملیات انجماد آب داخل مخازن است. چون بار سرمایی ساختمان وجود ندارد، «پمپ بار» خاموش می‌شود. پمپ چیلر روشن می‌شود و چیلر برای یخ‌سازی روشن می‌شود. در این حالت، چیلر با ظرفیت سرمایی کامل کار می‌کند و دمای سیال خروجی آن را بین (20°F(-6.7°C تا (25°F(-6.7°C کاهش می‌دهد که به اندازه کافی سرد است تا آب داخل مخازن منجمد شود.

در طول این حالت کار، سرعت «پمپ یخ» به گونه‌ای کنترل می‌شود که دبی پمپ (همان‌طور که در هنگام تعادل سیستم تعیین می‌شود) با دبی جریان طراحی پمپ چیلر با دبی ثابت مطابقت داشته باشد که باعث می‌شود تا آب داخل مخازن یخ در سریع‌ترین زمان ممکن منجمد شود.

حالت «انجماد و سرمایش» در سیستم بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر	پمپ غیراوج	چیلر غیراوج
انجماد و سرمایش	خاموش	روشن	یکسان با پمپ چیلر	یخ‌سازی	روشن	42°F (5.6°C)

پنجمین حالت عملیاتی، انجماد آب داخل مخازن و جبران بار سرمایی همزمان ساختمان است.

از آنجایی که سیستم‌های بزرگ معمولاً دارای چیلرهای متعدد هستند، رایج‌ترین روش این است که بارهای هم‌زمان را با یک چیلر جداگانه «غیراوج» (یا شبانه) تأمین کرد. به این وسیله چیلر یخ‌ساز اجازه پیدا میکند تا برای کار یخ‌سازی بهینه شود و انرژی را با برآوردن بارهای سرمایی همزمان در حالی که با بازده پاییـــن کار می‌کند، هدر ندهد. و به چیلر «غیراوج» اجازه می‌دهد تا برای بزرگترین بار ســـرمایی که انتظار می‌رود در دورهٔ زمانی که چیلر دیگر در حال یخ‌سازی

است، رخ دهد، اندازه و بهینه شود.

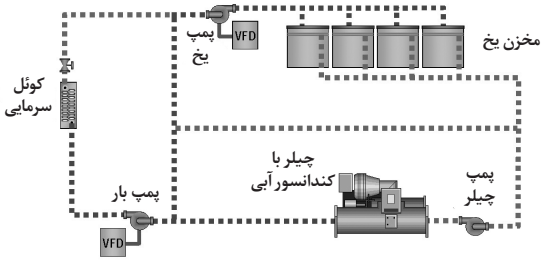
در طول این حالت، «پمپ بار» خاموش است و «پمپ چیلر»، چیلر یخ‌ساز و «پمپ یخ» هر کدام همان‌طور که برای حالت عملیاتی انجماد توضیح داده شد، کار می‌کنند.

«پمپ غیراوج» و چیلر «غیر اوج» برای برآوردن هرگونه بار سرمایی همزمان ساختمان روشن می‌شوند.

نقطهٔ تنظیم برای «چیلر غیراوج» به دمای رفت سیال سیستم تنظیم می‌شود. برای این مثال، آن نقطهٔ تنظیم 42°F یا 5.6°C است.

دبی «پمپ غیراوج» به گونه‌ای تعدیل می‌شود که دبی مورد نیاز برای تأمین بار روی کوئل‌های سرمایی را فراهم کند.

حالت «خاموش» در سیستم بزرگ



عملکرد	پمپ بار	پمپ چیلر	پمپ مخزن یخ	چیلر
خاموش	خاموش	خاموش	خاموش	خاموش

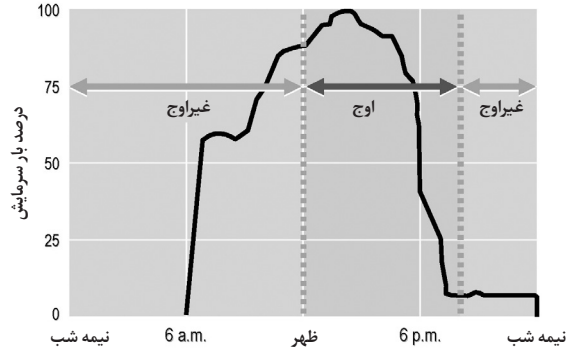
حالت عملیاتی نهایی، خاموش کردن سیستم است و مربوط به زمانی است که بار سرمایی ساختمان وجود نداشته باشد و تمام آب داخل مخازن منجمد شده باشد. در این حالت هر سه پمپ و چیلر خاموش هستند.

کنترل استراتژیک

پیش از این کنترل تاکتیکی یک سیستم ذخیره‌سازی یخ، یعنی نحوهٔ انجام عملکردهای مختلف یا حالت‌های عملیاتی مورد بحث قرار گرفت.

اینک در مباحث بعدی کنترل استراتژیک یک سیستم ذخیره‌سازی یخ، یعنی زمانی که باید حالت‌های مختلف عملیاتی را آغاز کرد، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

دوره‌های زمانی اوج و غیراوج



در بسیاری از ساختمان‌ها، بار سرمایی ناشی از حضور افراد، تجهیزات و به‌طور کلی فعالیت در ساختمان است. بنابراین، زمان‌هـــا و روزهایی که در آن این بارها وجود دارند، معمولاً تکراری هستند.

تصویر بالا نمودار بار سرمایی ساختمان مورد مثال است که شـــامل اغلب ســـاختمان‌های اداری، تجاری و آموزشی می‌شود.

اوج بارهای ســـرمایی برای این ســـاختمان نمونه بین ساعت 11 صبح تا 4 بعد از ظهر رخ می‌دهد. ظهر تا 8 شب به عنوان دورهٔ اوج، زمانی که تعرفهٔ مصرف برق گران‌تر است، تعریف می‌شود. تمام ساعات دیگر به عنوان دورهٔ کم مصرف یا غیراوج تعریف می‌شـــود، در این زمان تعرفه مصرف برق ارزان‌تر است.

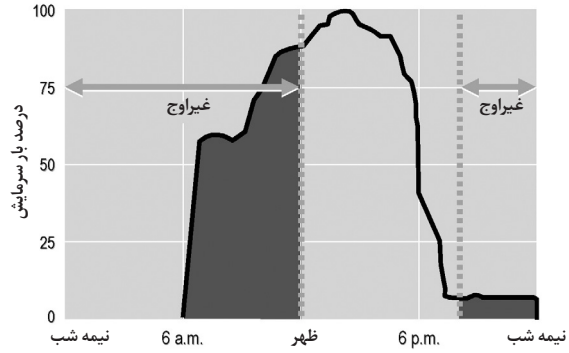
جدول کنترل استراتژیک

حالت عملکرد	زمان شروع	زمان پایان
فقط چیلر		
فقط یخ		
چیلر و یخ		
انجماد		
انجماد و سرمایش		
خاموش		

پس از مشخص شدن دوره‌های اوج و غیراوج، مرحله بعدی شناسایی زمانی از شبانه روز است که هر یک از حالت‌های عملکرد سیستم شروع و پایان می‌یابد.

زمان شروع و زمان پایان برای هر حالت عملیاتی را می‌توان در یک جدول کنترل استراتژیک، مانند آن‌چه در جدول بالا نشان داده شده است، درج کرد.

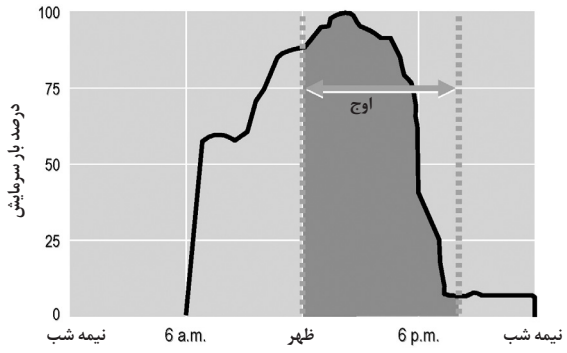
حالت «فقط چیلر»



در دوره‌هـــای غیراوج، هزینهٔ برق کمتر اســـت و اغلب هیچ هزینه‌ای برای تقاضا وجود ندارد. با برق کم هزینه، کارکردن چیلـــر معمولاً مقرون به صرفه‌ترین وســـیله برای جبران بار سرمایی ساختمان است.

در این مثال، بارهای سرمایی ساختمان که بین ساعت 6 صبح تا ظهر و بین ساعت 8 بعد از ظهر رخ می‌دهد. و نیمه شب، با کارکردن چیلر به تنهایی جبران می‌شوند. یخ ذخیره شده ذوب نمی‌شود، اما برای دورهٔ اوج ذخیره می‌شود.

حالت «فقط یخ»



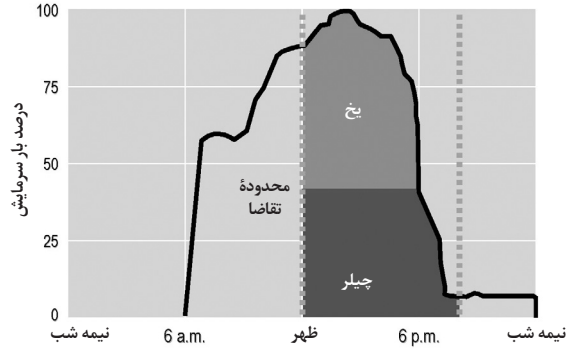
در دورهٔ اوج مصرف، هزینهٔ برق بیشتر است و ممکن است هزینهٔ تقاضا (دیماند) هم وجود داشته باشد.

ذوب یخ ذخیره شده برای تأمین بار سرمایی ساختمان، در حالی که چیلر خاموش اســت، می‌تواند هزینهٔ عملیاتی سیستم را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

در این مثال، بارهای سرمایشـــی ساختمان که در دورهٔ اوج بین ظهـــر تا 8 بعد از ظهر رخ می‌دهد. تنها با ذوب یخ جبران می‌شوند و چیلر خاموش است.

البته این استراتژی فقط در یک سیستم «ذخیره کامل» امکان‌پذیر است، سیستمی که ظرفیت مخازن یخ به اندازه کافی بزرگ است تا بارهای سرمایی در اوج روز را جبران کند.

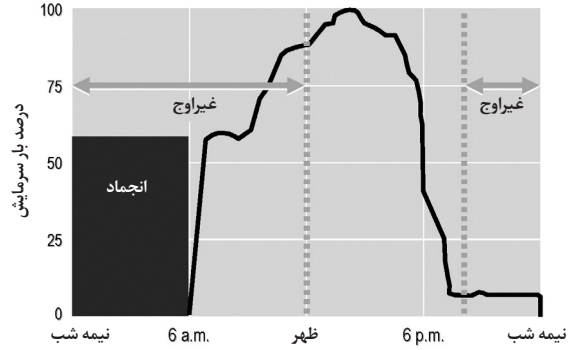
حالت «چیلر و یخ»



در یک سیســـتم «ذخیره‌ســـازی جزئی»، بخشی از بارهای سرمایی در اوج توســـط چیلر تأمین می‌شود. ظرفیت چیلر به گونه‌ای تنظیم می‌شـــود که تنها بخشـــی از بار را جبران کند و بارهای سرمایی بیشتر با ذوب یخ جبران می‌شود. در تصویر بالا، چیلر حدود 40 درصد از بار سرمایی طراحی را در طول دورهٔ اوج جبران می‌کند و ســـپس یخ ذوب می‌شود تا باقیمانده بارها را تأمین کند.

در روز طراحـــی (یـــا در بدترین حالت)، یک سیســـتم «ذخیره‌ســـازی جزئی» از حالت عملکـــرد «چیلر و یخ» در طول دورهٔ اوج مصرف استفاده می‌کند. اما، در روزهای کم شدت (بار جزیی)، سیستم ممکن است ظرفیت ذخیره‌سازی یخ کافی را داشـــته باشد تا تمام نیازهای سرمایی در اوج را فقط با یخ برآورده کند و اجازه دهد تا چیلر خاموش شود.

حالت «انجماد»



همان‌طور که قبلاً ذکر شد، سیستم‌های ذخیره‌سازی یخ، عملکرد چیلر را به دوره‌های خارج از دورهٔ اوج تغییر می‌دهند، یعنی زمانی که می‌تواند آب داخل مخازن یخ را منجمد کند در حالی که هزینهٔ برق کم است.

حالت عملیاتی «انجماد» را می‌توان در هر زمان در طول دورهٔ خاموشی استفاده کرد.

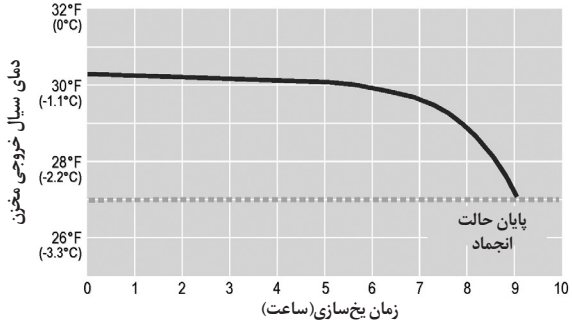
در این مثال، سیستم در نیمه شب در حالت «انجماد» شروع به کار می‌کند تا زمانی که تمام آب داخل مخازن یخ بزند یا تا ساعت 6 صبح که بار سرمایی ساختمان دوباره وجود خواهد داشت. با افزایش بار سرمایی ساختمان فرایند انجماد متوقف می‌شود.

تا این مرحله، هر حالت عملیاتی بر اساس زمان روز و ارتباط آن با دوره‌های اوج و غیراوج شروع یا خاتمه یافته است. در بسیاری از روزها، تمام آب داخل مخازن

ذخیره‌ســـازی قبل از پایان زمان تعیین شده، یعنی قبل از ساعت 6 صبح (در این مثال)، منجمد می‌شود. دلیل ممکن اســـت این باشد که ظرفیت مخازن یخ بیشـــتر از نیازهای سرمایی در اوج روز قبل بوده است.

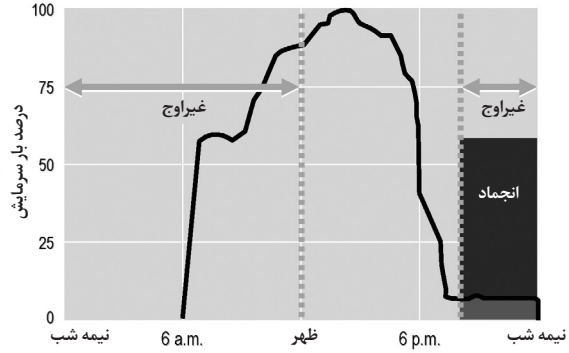
وقتی که این اتفاق می‌افتد، ممکن اســـت تنها بخشی از یخ داخل مخازن ذوب شده باشد و سیستم ممکن است نیازی به کار در حالت «انجماد» برای کل دورهٔ خارج از اوج نداشته باشد.

حالت « پایان انجماد»



یک سیگنال ساده، قابل اعتماد و قابل تکرار برای نشان دادن پایان حالت «انجماد» در دسترس است. اگر در طول فرآیند یخ‌ســـازی مقدار زیادی آب در داخل مخزن یخ وجود داشته باشد، دمای ســـیال خروجی از مخزن نسبتاً ثابت می‌ماند. اما، با یخ زدن بیشتر آب، مقدار آبی که هنوز منجمد نشده کاهش می‌یابد و دمای ســـیالی که از مخزن خارج می‌شود شروع به کاهش می‌کند. این دمای سیال خروجی را می‌توان به عنوان نشانگر مقدار آبی که هنوز در داخل مخزن منجمد نشده است و بنابراین، زمانی که حالت «انجماد» را می‌توان پایان داد، استفاده کرد. در مثال نشان داده شده در تصویر بالا، دمای سیال خروجی از مخزن شش ساعت پس از شروع حالت «انجماد» شروع به کاهش می‌کند. هنگامی که دمای سیال خروجی به 27°F (2.8°C) کاهش می‌یابد، آب داخل مخازن یخ منجمد در نظر گرفته می‌شود و حالت «انجماد» را می‌توان پایان داد.

حالت « انجماد و سرمایش»



گاهی اوقات، ممکن اســت لازم باشد که آب داخل مخازن یخ منجمد شود و همزمان بار سرمایی ساختمان هم تأمین شــود. در این مثال زمان مورد نیــاز برای یخ زدن تمام آب داخل مخازن بیشــتر از دورهٔ شش ســاعته از نیمه شب تا ساعت 6 صبح است، بنابراین چیلر نیز باید در حالت یخ‌سازی بین ســاعت 8 تا نیمه‌شب کار کند. در طول این مدت، بار سرمایی ساختمان نیز وجود دارد.

در ایــن حالت «انجماد و ســرمایش»، چیلر در حالت یخ‌سازی کار می‌کند، اما بار سرمایی ساختمان را نیز تأمین می‌کند. سیستم تا زمانی که تمام آب داخل مخازن منجمد شود یا تا نیمه شــب که دیگر بار سرمایی ساختمان وجود نداشته باشد، در این حالت باقی می‌ماند.

جدول کامل شدهٔ کنترل استراتژیک

حالت عملکرد	زمان شروع	زمان پایان
فقط چیلر	6 a.m.	ظهر
فقط یخ	ظهر	8 p.m.
چیلر و یخ	ظهر	8 p.m.
فقط چیلر	8 p.m.	نیمه شب
انجماد و سرمایش	8 p.m.	نیمه شب
انجماد	نیمه شب	6 a.m.
خاموش	عدم نیاز به سرمایش و یخ‌سازی	

از ساعت 6 صبح تا ظهر، سرمایش تنها با کارکردن چیلر تأمین می‌شود.

از ظهر تا ساعت 20 در صورتی که مخازن یخ ظرفیت کافی داشته باشند، سرمایش به تنهایی با ذوب یخ تأمین می‌شود و می‌توان چیلر را خاموش کرد. در غیر این صورت، سرمایش با کارکردن چیلر و همزمان ذوب یخ فراهم می‌شود.

از ساعت 8 شب تا نیمه شب، سرمایش دوباره با کار کردن چیلر به تنهایی تأمین می‌شود.

در نیمه‌شب، سیستم شروع به انجماد آب داخل مخازن می‌کند. این حالت تا زمانی ادامه می‌یابد که دمای سیال خروجی از مخزن به 27°F (-2.8°C) یا تا ساعت 6 صبح کاهش یابد.

اما، اگر حالت «انجماد» بیش از دورهٔ شش ساعته از نیمه‌شب تا ساعت 6 صبح نیاز داشته باشد، سیستم باید

برای برخی از زمان‌ها بین ساعت 8 بعد از ظهر تا نیمه‌شب در حالت «انجماد و سرمایش» کار کند، زمانی که بار سرمایش ساختمان نیز وجود دارد.

در نهایت، بین نیمه‌شب تا ساعت 6 صبح، اگر تمام آب داخل مخازن یخ زده باشد، می‌توان سیستم را خاموش کرد، زیرا ساختمان فاقد بار سرمایشی است.

ترکیب کنترل تاکتیکی و استراتژیک

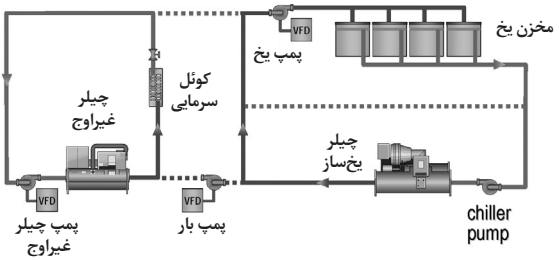
حالت عملکرد	زمان شروع	زمان پایان
فقط چیلر	6 a.m.	ظهر
فقط یخ	ظهر	8 p.m.
چیلر و یخ	ظهر	8 p.m.
فقط چیلر	8 p.m.	نیمه شب
انجماد و سرمایش	8 p.m.	نیمه شب
انجماد	نیمه شب	6 a.m.
خاموش	عدم نیاز به سرمایش و یخ‌سازی	

باید توجه داشت که در برخی دوره‌های زمانی، ممکن است بیش از یک حالت عملیاتی استفاده شود.

در طول دورهٔ اوج بین ظهر تا 8 بعد از ظهر، بار سرمایشی ساختمان ممکن است با ذوب یخ به تنهایی یا با ترکیبی از ذوب یخ و کار با چیلر تأمین شود.

در دورهٔ غیر اوج بین ساعت 8 شب تا نیمه شب، چیلر ممکن است در حالت فقط سرمایشی برای تأمین بار سرمایش ساختمان کار کند، یا ممکن است در حالت یخ‌سازی برای یخ زدن آب داخل مخازن یخ در حالی که به‌طور همزمان بار سرمایش ساختمان را تأمین می‌کند، کار کند.

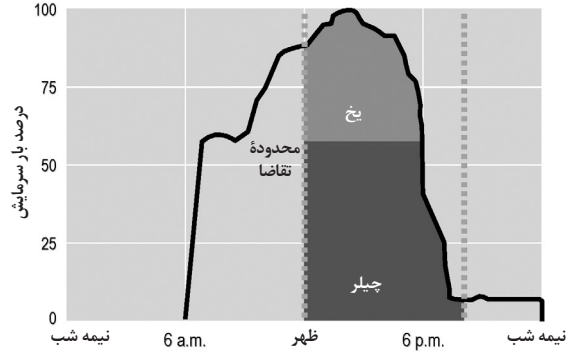
انجماد و سرمایش



اگر بارهای سرمایی ساختمان در طول زمانی که سیستم قرار است یخ بسازد وجود، قابل توجه باشد، معمولاً استفاده از چیلر جداگانه و «خارج از اوج» برای تأمین این بارها سودمند است. زیرا چیلر یخ‌ساز به وقت ساخت یخ کارایی کمتری دارد.

چیدمانی که در تصویر بالا نمایش داده شده است، به چیلر یخ‌ساز اجازه می‌دهد تا از ظرفیت کامل خود برای انجماد آب داخل مخازن در سریع ترین زمان ممکن استفاده کند. اما، اگر سیستم فقط از یک چیلر تشکیل شده باشد، حالت عملکرد «انجماد و سرمایش» ممکن است غیرقابل اجتناب باشد. در این مورد، استفاده از حالت عملیاتی «انجماد و سرمایش» باید فقط به گرم‌ترین بخش از فصل سرمایش و وقتی که سیستم احتمالاً به زمان اضافی برای انجماد آب داخل مخازن نیاز دارد، محدود شود.

کندی ذوب یخ



تعیین این‌که آیا از حالت عملکرد «فقط یخ» یا «چیلر و یخ) در طول دوره اوج مصرف برای یک روز معین استفاده شود، تصمیم دشوارتری اســـت. البته این مورد، تنها یک مشکل برای «سیستم ذخیره‌سازی جزئی» است.

یک «سیستم ذخیره‌سازی کامل» ظرفیت ذخیره‌سازی کافی برای برآوردن کل بار سرمایی در اوج را برای روز طراحی (یا در بدترین حالت) خواهد داشت و به چیلر اجازه می‌دهد در این بازهٔ زمانی در طول هر روز خاموش شود.

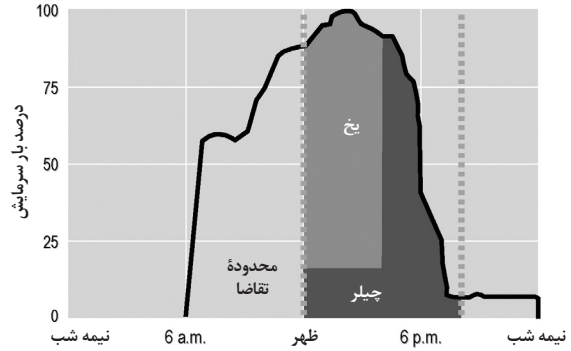
اگر وظیفهٔ اصلی یک سیستم ذخیره‌سازی جزئی کاهش مصرف برق در اوج (کیلووات ســـاعت) باشد، معمولاً ذوب کردن یخ ذخیره شـــده تا حد امکان در این دوره اوج مصرف بسیار سودمند است. این به چیلر اجازه می‌دهد تا با کمترین ظرفیت ممکن کار کند.

اگر یخ خیلی آهســـته ذوب شود، ممکن است در پایان

دورهٔ اوج، یخ ذوب نشـــده در مخازن باقی بماند. این بدان معناست که چیلر باید با ظرفیتی بالاتر از حد لازم کار می‌کرد.

در مثالی که در تصویر بالا نشان داده شده است، تنظیم محدودیت تقاضا برای چیلر بسیار زیاد است و باعث می‌شود چیلر با ظرفیت بالاتر از حد لازم کار کند. این امر ســـرعت ذوب شـــدن یخ را کاهش می‌دهد و یخ ذوب نشده در پایان دورهٔ اوج در مخازن باقی می‌ماند.

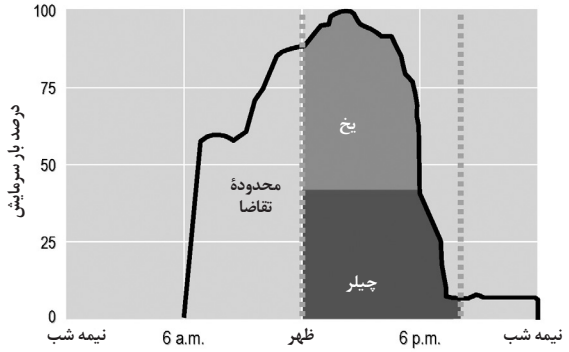
تندی ذوب یخ



برخلاف مبحث پیش، اگر یخ خیلی سریع ذوب شود، ممکن اســـت قبل از پایان دورهٔ اوج، مصرف شـــود. این امر باعث می‌شـــود که چیلر در پایان ایـــن دوره نیاز به کار با ظرفیت بسیار بالاتر از حد لازم داشته باشد.

در مثال نشان داده شده در تصویر بالا، تنظیم حد تقاضا برای چیلر بســـیار کم است و باعث می‌شود یخ خیلی سریع ذوب شود. تا ساعت 4 بعد از ظهر، تمام یخ ذوب می‌شود و چیلر باید ظرفیت خود را به میزان قابل توجهی افزایش دهد تا بار ســـرمایی ساختمان را جبران کند. اگر نرخ برق شامل شـــارژ در اوج تقاضا (دیماند) باشد، این افزایش در مصرف برق چیلر (کیلووات) هزینهٔ بیشتری به همراه خواهد داشت.

زمان بهینهٔ ذوب یخ

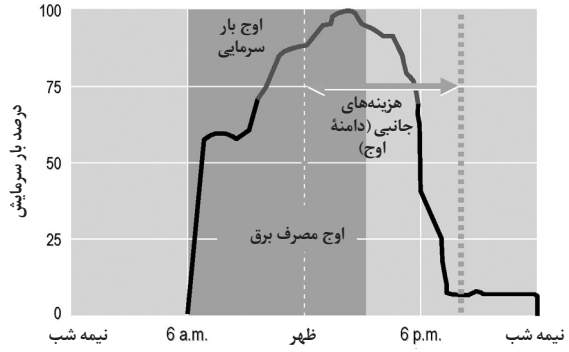


در این مثال آخر، چیلر برای کار با ظرفیتی که اجازه می‌دهد تا یخ با سرعت بهینه ذوب شود، محدودیت تقاضا دارد و اطمینان حاصل می‌کند که تمام یخ تا پایان دورهٔ اوج ذوب می‌شود.

کنترل‌های سطح سیستم را می‌توان برای پیش‌بینی نرخ ذوب «بهینه» برای یک روز معین و سپس محدودیت تقاضا برای چیلر استفاده کرد. این معمولاً شامل نظارت بر بار سرمایشی ساختمان قبل از شروع دورهٔ اوج و مقایسه آن بار با بار مورد انتظار در روز طراحی است.

تعیین این‌که آیا چیلر باید در دورهٔ اوج کار کند و با چه ظرفیتی باید کار کند، تصمیمات اقتصادی است. این تصمیمات ارتباط مستقیمی با قبض برق ماهانه دارد، به خصوص زمانی که نرخ برق شامل هزینهٔ تقاضا(دیماند) باشد.

بارگذاری اتفاقی

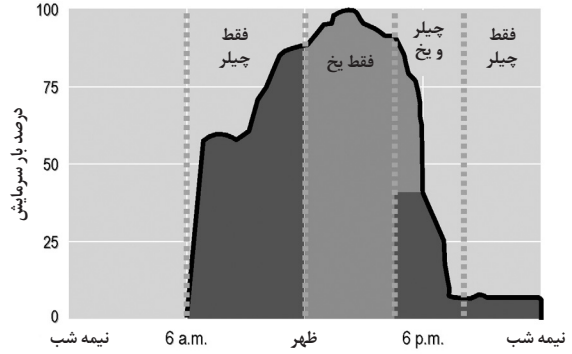


اگر وظیفهٔ اولیه یک «سیستم ذخیره‌سازی جزئی» کاهش تقاضای الکتریکی در اوج (کیلووات) باشد، ذخیره یخ معمولاً بیشترین سود اقتصادی خود را در زمانی که بار سرمایی ساختمان، هزینهٔ برق و بار الکتریکی ساختمان به‌طور همزمان به اوج می‌رسد، فراهم می‌کند.

برای ساختمان مورد مثال، در حالی که یک بار سرمایی از ساعت 6 صبح تا نیمه شب وجود دارد، بیشترین بار سرمایی بین 10 صبح تا 6 بعد از ظهر رخ می‌دهد. نرخ برق در زمان پیک بین ظهر تا 8 بعد از ظهر وجود دارد و بیشترین مصرف برق کلی ساختمان زودتر از ساعت 6 صبح شروع می‌شود و تا ساعت 3 بعد از ظهر کاهش می‌یابد.

در این مثال، ذوب یخ تا حد امکان بین ظهر تا 3 بعد از ظهر سودمند است. بعد از ساعت 3 بعد از ظهر، استفاده از برق ساختمان رو به کاهش است و ممکن است بتوان چیلر را بدون افزایش اوج تقاضای برق در روز به کار انداخت.

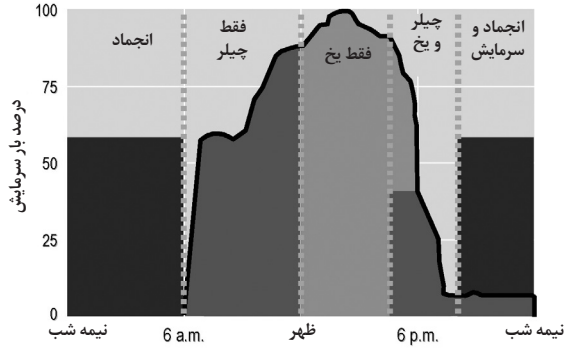
اصلاح اوج



در تصویر بالا، ظرفیت ذخیره‌سازی یخ کافی برای پاسخگویی به بیشتر بارهای سرمایی در اوج در روز مورد مثال وجود دارد، اما برای پاسخگویی به بارها در کل دورهٔ اوج کافی نیست. بنابراین، سیستم از حالت عملیاتی «فقط یخ» بین ظهر تا 4 بعد از ظهر استفاده می‌کند. همان‌طور که گفته شد، تقاضای برق ساختمان پس از ساعت 3 بعد از ظهر شروع به کاهش می‌کند. از ساعت 4 بعدازظهر، چیلر روشن و تقاضا محدود می‌شود تا چیلر و یخ با هم ترکیب شوند تا بارهای سرمایی را در طول باقی‌مانده دورهٔ اوج مصرف (تا ساعت 8 بعد از ظهر) برآورده کنند.

حتی اگر چیلر که در طول دورهٔ اوج کار می‌کند، این کار را هم‌چنان تا زمانی که تقاضای برق برای بقیهٔ ساختمان کاهش می‌یابد، ادامه می‌دهد. کارکردن چیلر در این زمان باعث افزایش تقاضای برق در اوج (کیلووات) ساختمان نمی‌شود.

کنترل تاکتیکی و استراتژیک



ترکیب کنترل تاکتیکی و استراتژیک زمان شروع و زمان پایان را برای هر حالت عملیاتی تعریف می‌کند:

در ساعت 6 صبح بار سرمایی ساختمان وجود دارد و چیلر برای جبران بار راه‌اندازی می‌شود.

نرخ‌های برق کم هزینه و بدون اوج تا ظهر ادامه دارد. بنابراین، از ساعت 6 صبح تا ظهر، تأمین سرمایش «فقط با چیلر» بسیار مفید است.

نرخ‌های بالاتر و در اوج برق شهری از ظهر شروع می‌شود. با توجه به این نرخ‌های بالاتر و هزینه‌های تقاضا در زمان اوج، تأمین سرمایش تنها با «ذوب یخ» بسیار سودمند است. چیلر خاموش می‌شود.

در این مثال، ظرفیت ذخیره‌سازی یخ کافی برای پاسخگویی به بیشتر بارهای سرمایی در اوج وجود دارد، اما برای پاسخگویی به بارها در کل دورهٔ اوج کافی نیست. این

سیســـتم از حالت عملکرد «فقط یخ» بین ظهر تا 4 بعد از ظهر استفاده می‌کند.

تقاضای برق ســـاختمان بین ســـاعت 3 تا 4 بعد از ظهر شروع به کاهش می‌کند. و از ساعت 4 بعدازظهر، چیلر روشن و تقاضا محدود می‌شـــود تا چیلر و یخ با هم ترکیب شوند تا بارهای ســـرمایی را در طول باقی‌مانده دورهٔ اوج مصرف (تا ساعت 8 بعد از ظهر) جبران کنند.

در ســـاعت 8 بعد از ظهر، نرخ برق کم‌هزینه و بدون اوج بازگشته اســـت. در این زمان، سیســـتم حالت «انجماد و سرمایش»را آغاز می‌کند تا شـــروع به انجماد آب در داخل مخازن یخ کند و در عین حال بار سرمایی همزمان ساختمان را نیز تأمین کند.

در نیمه شب بار ســـرمایی ساختمان متوقف می‌شود و چیلر به‌طور کامل به انجمـــاد آب داخل مخازن می‌پردازد. سیســـتم تا زمانی که تمام آب داخل مخازن منجمد شـــود یا تا ساعت 6 صبح که بار ســـرمایی ساختمان بازگردد، در حالت«انجماد» باقی می‌ماند.

اگر آب داخل مخازن کاملاً یخ زده باشـــد و بار سرمایی ساختمان وجود نداشته باشد، می‌توان سیستم را خاموش کرد.

مراجع

For more information، refer to the following references:

- Ice Storage Systems Applications Engineering Manual (Trane literature order number SYS-AM-10)
- Control of Ice Storage Systems Applications Engineering Manual (ICS-AM-4)
- Multiple-Chiller-System Design and Control Applications Engineering Manual (SYSAPM001 EN)
- Chilled-Water Systems Air Conditioning Clinic (TRG-TRC016-EN)
- ASHRAE Handbook – HVAC Applications

Visit the ASHRAE Bookstore at www.ashrae.org.

For more information on additional educational materials available from Trane، contact your local Trane office (request a copy of the Educational Materials catalog – Trane literature order number EM-ADV1) or visit our online bookstore at www.trane.com/bookstore/.

تاکنون از همین مؤلف منتشر شده است

۱- تئوری گشایش‌ها (سه جلد)، انتشارات گوتنبرگ، ۱۳۶۸
۲- فرهنگ تأسیسات ساختمان، ویراست اول (انتشارات سالکان ۱۳۷۶)، ویراست دوم (نشر کتاب دانشگاهی ۱۳۸۳)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۸)
۳- تله بخار، ویراست اول (انتشارات سورمق ۱۳۸۲)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)
۴- راهنمای مهندسی گرمایش و تهویه مطبوع ویرایش یازدهم، چاپ اول تا چهارم (نشر کتاب دانشگاهی ۱۳۸۴)، چاپ پنجم (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)، چاپ ششم (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)
۵- طبقه‌بندی تجهیزات و سیستم‌ها، ویراست اول (انتشارات سورمق ۱۳۸۵)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۰)
۶- مراجعات سریع، ویراست اول (انتشارات سورمق ۱۳۸۵)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۸)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)
۷- برق برای تهویه مطبوع، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)
۸- سایکرومتریک، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)
۹- چیلر جذبی، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۷)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۰)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۷)
۱۰- دستنامه تأسیسات، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۸)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۷)

۱۱- فرهنگ جیبی تأسیسات ساختمان، انتشارات یزدا ۱۳۸۹
۱۲- طراحی موتورخانه، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۹)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۰)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۴)
۱۳- اقلیم، معماری، تهویه‌مطبوع، چاپ اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۰)، چاپ دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)
۱۴- جزئیات تأسیسات ساختمان، انتشارات یزدا ۱۳۹۱
۱۵- چیلر تراکمی، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۱)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۵)
۱۶- تأسیسات مکانیکی برای دانشجویان معماری، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۹)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۰)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۱)، ویراست پنجم (انتشارات یزدا ۱۳۹۸)
۱۷- تأسیسات برقی برای دانشجویان معماری، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۹۵)
۱۸- سیستم‌های اعلام حریق، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۸۵)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۸)، ویراست سوم (انتشارات یزدا ۱۳۸۹)، ویراست چهارم (انتشارات یزدا ۱۳۹۲)، ویراست پنجم (انتشارات یزدا ۱۳۹۴)
۱۹- محاسبات بار سرمایی و گرمایی، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۴۰۰)
۲۰- چیلر پیچی و گریز از مرکز، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۴۰۰)
۲۱- آشنایی با چیلر جذبی، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۴۰۰)
۲۲- آشنایی با سیستم‌های تهویه مطبوع، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۴۰۰)

۲۳- اجزا و چرخهٔ سرمایش، ویراست اول (انتشارات یزدا ۱۳۹۳)، ویراست دوم (انتشارات یزدا ۱۴۰۰)
۲۴- طراحی تأسیسات ساختمان (دو جلد، انتشارات یزدا ۱۳۹۴)
۲۵- Leed، معیاری برای ساختمان سبز، انتشارات یزدا ۱۳۹۵
۲۶- تاسیسات برقی و مکانیکی ساختمان‌های بلند، انتشارات یزدا ۱۳۹۶
۲۷- پهنه‌بندی اقلیمی ایران، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۲۸- آسایش حرارتی، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۲۹- معماری همساز با اقلیم، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۰- دیباچه و تهیه‌ی گزارش فاز یک، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۱- محاسبات بار و انتخاب تجهیزات مولد، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۲- انتخاب تجهیزات تبادل حرارت، مکمل و مرکب، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۳- تجهیزات انتقال و توزیع، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۴- آب و فاضلاب، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۵- طراحی اماکن و تجهیزات خاص، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۶- تنظیم شـــرایط محیطی (به کمک تأسیســـات مکانیکی)، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۷- صدا، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۸- تخمین بارهای گرمایی و سرمایی شهرهای ایران، انتشارات یزدا ۱۳۹۷
۳۹- مصرف بهینهٔ انرژی در تهویه مطبوع، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۰- پمپ حرارتی، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۱- سیستم حجم متغیر هوا، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۲- سیستم‌های کنترل تهویه مطبوع، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۳- فن‌های تهویه مطبوع، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۴- شبکه‌های آب سرد، انتشارات یزدا ۱۴۰۰
۴۵- مبانی سایکرومتری، انتشارات یزدا ۱۴۰۰

Ice Storage

A Trane Air Conditioning Clinic