

تأسیسات تبرید صنعتی،

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

وزارت نیرو

سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)

تأسیسات تبرید صنعتی

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

تهیه و تدوین:

سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا)

تأسیسات تبرید صنعتی ، طراحی با هدف بهره‌وری انرژی .
تهیه و تدوین: سازمان بهره‌وری انرژی ایران - تهران: وزارت نیرو، معاونت امور انرژی
+ نشر صدوق ۱۳۷۸
و ، ۹۸ ص: جدول ، نمودار **IS BN-964-6553-06-0**
۱. سردسازی و دستگاه‌های سردکننده - مصرف انرژی
الف : سازمان بهره‌وری انرژی ایران ب: ایران . وزارت نیرو. معاونت امور انرژی . ج : آزمایشگاه
هارول . واحد حمایت تکنولوژی انرژی
Harwell Laboratory. Energy Technology Support Unit [H. L.E. T. S. U]
ت ۹۱ / س / ۴۹۲ TP ۶۲۱/۵۶ ۳۳۱۷ - ۷۸ م

این کتاب ترجمه‌ای است از مجموعه کتاب‌های " راهنمای فنی بهره‌وری انرژی " (Good Practice Guide 44) که توسط " ETSU " انگلستان چاپ و منتشر شده است.

تأسیسات تبرید صنعتی، طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

تهیه و تدوین : سازمان بهره‌وری انرژی ایران
ناشر : وزارت نیرو - سازمان بهره‌وری انرژی ایران
ویرایش و بازنگری مجدد : علیرضا محمدیه
حروفچینی : نسرين سلیمانی
خدمات فنی : نشر پارسیان سبز
نوبت چاپ : دوم - تابستان ۸۳
لیتوگرافی و چاپ : چاپ فرشویه
تیراژ : ۵۰۰۰ نسخه

تأسیسات تبرید صنعتی،

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

شابک: ۹۶۴-۶۵۵۳-۰۶-۰ / I. S. B. N. 964-6553-06-0

حق چاپ برای ناشر محفوظ است

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
۱- معرفی.....	۱
۱-۱- هدف و محتوای این کتاب.....	۱
۲-۱- طراحی با هدف افزایش کارایی.....	۳
۳-۱- ساختار این کتاب راهنما.....	۶

بخش اول : کارایی سیستم‌های تبرید

۲- نیازهای صنعتی.....	۹
۱-۲- انتخاب ماده مبرد.....	۱۰
۲-۲- نوع چرخه کاری سیکل تبرید.....	۱۰
۳-۲- سایر مسایل مهم در طراحی.....	۱۱
۴-۲- اهمیت تجزیه و تحلیل بار سرمایی.....	۱۱
۵-۲- جمع‌آوری اطلاعات.....	۱۲
۶-۲- انواع بارهای سرمایی.....	۱۲
۷-۲- تفکیک بارهای سرمایی.....	۱۹
۸-۲- نمودار بارهای سرمایی.....	۱۹
۹-۲- نمودار نمایش حدهای درجات حرارت.....	۲۰
۱۰-۲- حدهای درجات حرارت.....	۲۲
۱۱-۲- تکنولوژی تجمیع (Pinch).....	۲۲
۳- خلاصه بخش اول: کارایی سیستم تبرید.....	۲۳

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

بخش دوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

- ۴- کاهش بار گرمایی ۲۵
- ۵- سردسازی طبیعی ۲۹
- ۵-۱- چگونه فرصت‌های ممکن برای سردسازی طبیعی را شناسایی کنیم؟ ۳۰
- ۵-۲- شیوه‌های سردسازی طبیعی محیطی ۳۳
- ۵-۳- سردسازی طبیعی محصولی با محصول دیگر ۳۶
- ۶- خلاصه بخش دوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند ۳۷

بخش سوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

- ۷- انتخاب نوع پیکربندی و چرخه کاری ۳۹
- ۷-۱- انتخاب مبرد ۴۰
- ۷-۲- مردهای ثانویه ۴۲
- ۷-۳- تبرید دو مرحله‌ای ۴۳
- ۷-۴- اواپراتورهای انبساط مستقیم و اواپراتورهای غوطه‌ور ۴۳
- ۷-۵- طرح یکپارچه در مقابل طرح چند بخشی ۴۴
- ۷-۶- اواپراتورهای موازی و متوالی ۴۶
- ۸- تدابیر کنترلی ۴۶
- ۸-۱- عملکرد کمپرسورهای تحت بار جزئی ۴۸
- ۸-۲- کنترل ترتیب کار کمپرسورها ۴۸
- ۸-۳- کنترل ظرفیت کمپرسور ۴۹
- ۸-۴- کنترل فشار مکش ۵۳
- ۸-۵- کنترل فشار خروجی کمپرسور ۵۳
- ۹- سایر ملاحظات ۵۳
- ۹-۱- بازیابی حرارت ۵۳

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

- ۹-۲- ذخیره حرارتی ۵۵
۱۰- خلاصه بخش سوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم ۵۶

بخش چهارم: طراحی اجزاء

- ۱۱- انتخاب کمپرسور و توالی راه‌اندازی آنها ۵۷
۱۱-۱- بازدهی تحت بار کامل ۵۸
۱۱-۲- اطلاعات ارائه شده از سوی سازندگان ۵۹
۱۱-۳- نمودار بازدهی کمپرسورها ۶۲
۱۱-۴- بازدهی تحت بار جزئی ۶۳
۱۱-۵- ترتیب‌گذاری کمپرسورها ۶۴
۱۱-۶- ملاحظات مالی ۶۵
۱۲- انتخاب و تعیین اندازه‌ی مبدل‌های حرارتی ۶۵
۱۲-۱- تأثیر اندازه‌ی مبدل‌های حرارتی ۶۶
۱۲-۲- ملاحظات مالی ۷۱
۱۲-۳- استفاده از مبدل‌های حرارتی با ضریب انتقال حرارتی بالا ۷۲
۱۲-۴- کاهش میزان اختلاف دمای ذاتی بین محیط‌های سرد و گرم ۷۲
۱۲-۵- توان مصرفی توسط تجهیزات جانبی ۷۳
۱۳- انتخاب شیر انبساط ۷۴
۱۳-۱- اجتناب از کنترل فشار تخلیه‌ی کمپرسور ۷۵
۱۳-۲- علت و میزان اتلاف انرژی ۷۶
۱۳-۳- روش‌های کنترل فشار تخلیه ۷۷
۱۳-۴- شیرهای انبساط حساس به دما (ترموستاتیکی) TEV ۷۸
۱۳-۵- روش‌های غیر از TEV برای کنترل فشار تخلیه ۷۹
۱۳-۶- سایر روش‌های اجتناب از کنترل فشار تخلیه ۷۹

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

- ۱۴- سیستم‌های برفک‌زدایی ۸۰
- ۱-۱۴- فرصت‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۸۱
- ۲-۱۴- کاهش میزان برفک‌گذاری سیستم ۸۲
- ۳-۱۴- طراحی کویل تبخیر به منظور کاهش تشکیل برفک ۸۳
- ۴-۱۴- انتخاب سیستم برفک‌زدایی ۸۴
- ۵-۱۴- برفک‌زدایی به هنگام نیاز ۸۵
- ۶-۱۴- کنترل سیکل برفک‌زدایی ۸۶
- ۷-۱۴- برفک‌زدایی به کمک گاز داغ ۸۷
- ۱۵- خلاصه بخش چهارم: طراحی اجزاء ۸۷

بخش پنجم: طراحی با هدف ایجاد سهولت در عملیات تعمیر و نگهداری

- ۱۶- اندازه‌گیری و ابزار دقیق ۸۹
- ۱۷- طراحی تأسیسات ۹۱
- پیوست ۱ - منابع اطلاعاتی ۹۳
- پیوست ۲ - محاسبه نمودار تغییرات دما و بار سرمایی ۹۳
- پیوست ۳ - محاسبه بازده راندمان کمپرسور ۹۵
- پیوست ۴ - فهرست علائم و واحدها ۹۹

پیشگفتار

افزایش روزافزون مصرف انرژی در تمام شئون زندگی و محدودیت منابع انرژی از یکسو و مصرف بی‌رویه آن توسط جوامع مختلف از سوی دیگر، علاوه بر آلودگی محیط زیست و هدر دادن سرمایه‌های ملی، زندگی آینده بشر را با مخاطره مواجه ساخته است.

تجربه ایران و جهان در دهه‌های گذشته نشان می‌دهد که رشد اقتصادی و توسعه صنعتی به عنوان پیش شرط‌های اقتدار سیاسی، استقلال ملی و شکوفایی فرهنگی، به عوامل مختلف از جمله انرژی و بهره‌وری مطلوب و بهینه از منابع آن نیازمند است.

اگرچه ایران از غنی‌ترین منابع انرژی برخوردار است اما تلف کردن و استفاده نادرست از آن خسارات جبران‌ناپذیری را بر بودجه سالانه کشور تحمیل می‌کند. از این رو استفاده منطقی از انرژی و برنامه‌ریزی در این زمینه از اولویت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

با آگاهی نسبت به اهمیت این امر بود که دولت جمهوری اسلامی ایران با تصویب بند (و) تبصره (۱۹) و در پی آن قانون برنامه دوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، حرکت در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی و گسترش مصرف منطقی منابع انرژی را به صورت وظیفه‌ای برای مسئولان درآورد و در راستای همین قانون و همچنین قانون برنامه سوم توسعه آئین‌نامه‌های اجرایی به تصویب رسید که از آن جمله، آئین‌نامه اجرایی بند الف تبصره ۲۷، طراحی دوره‌های آموزشی مدیران و کارشناسان واحدهای مدیریت انرژی برای صنایع و مؤسسات، تشکیل واحد

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

مدیریت انرژی در صنایع با توان مصرفی بالا، برگزاری سمینارهای آگاهسازی، تهیه کتاب‌ها و بروشورهای فنی جهت گسترش فرهنگ صحیح مصرف انرژی را می‌توان نام برد.

در همین راستا، معاونت امور انرژی وزارت نیرو در سال ۱۳۷۵ نسبت به ترجمه و چاپ (راهنمای فنی مدیریت انرژی) در ۲۱ جلد اقدام کرد و اینک سری جدیدی تحت عنوان (راهنمای فنی بهره‌وری انرژی) انتشار می‌یابد که از سوی ETSU در کشور انگلستان با نام **Best Practice programme (Energy Efficiency)** چاپ شده است.

این کتاب از سری راهنماهای فنی بهره‌وری انرژی ۵۶ جلدی انتخاب گردیده که با توجه به استقبال مخاطبین، چاپ دوم این کتاب با ویراستاری و بازنگری مجدد متن صورت گرفته است. امید است به لحاظ اهمیت موضوع، بقیه مجلدات آن به ترتیب چاپ و در اختیار علاقمندان قرار گیرد.

سازمان بهره‌وری انرژی ایران
(سابا)

◀ تازه‌های نشر در سال ۱۳۸۳

- راهنمای عملی استفاده بهینه از وسایل خانگی
- عایق‌های حرارتی (چگونه در انرژی و پول صرفه‌جویی کنیم؟)
- مقدمه‌ای بر سیستم‌های تولید مشترک برق و حرارت
- بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت شیر
- راهنمای کاهش هزینه‌های مصرف انرژی در موتورهای الکتریکی و سیستم‌های محرک (تجدید چاپ)
- تأسیسات تبرید صنعتی، طراحی با هدف بهره‌وری انرژی (تجدید چاپ)
- جنبه‌های زیست محیطی سیستم‌های ترکیبی بزرگ حرارت و قدرت (تجدید چاپ)

۱- معرفی

۱-۱- هدف و محتوای این کتاب

بخش مهمی از انرژی مصرفی در انگلستان صرف ایجاد سرما می‌گردد. هزینه برق مصرفی در این مورد سالیانه بالغ بر ۲ میلیارد پوند (بر اساس قیمت‌های سال ۱۹۹۱) می‌باشد که این مقدار حدود ۱۷ درصد کل مصرف برق در انگلستان را شامل می‌شود. تبرید صنعتی حدود $7/5 \times 10^9$ کیلووات ساعت انرژی مصرف می‌کند که هزینه آن در حدود ۳۰۰ میلیون پوند در سال است. در بعضی از صنایع مانند صنایع غذایی و مواد نوشیدنی و شیمیایی، درصد بزرگی از هزینه کلی مصرف انرژی، صرف تبرید می‌گردد.

این راهنما برای طراحان و خریداران تجهیزات تبرید در بخش صنعت نوشته شده است. با استفاده از این کتاب می‌توان به بهبود قابل توجهی در بازدهی، استفاده مؤثرتر از سرمایه اولیه، سرمایه‌سازی بهتر و عملکردهای پیشرفته‌تری از دیدگاه محیط زیست دست یافت. عملیات راهبری و نگهداری از سیستم‌های تبرید در راهنمای شماره ۴۲ بیان گردیده است که شامل اطلاعات مقدماتی مفیدی برای افرادی است که آشنایی چندانی با اصول پایه مورد نیاز جهت طراحی و به کارگیری موثر سیستم‌های تبرید ندارند.

مطالعات اخیر نشان داده است که روش‌های کم هزینه و موثر بسیاری وجود دارد که به کمک آنها می‌توان در مصرف کلی انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای صرفه‌جویی

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

نمود. کاهش هزینه‌ها تا حدود ۲۰ درصد همراه با بازگشت سرمایه اولیه تا حد چشمگیری در میان مدت قابل حصول است. اما شناسایی منابع بالقوه صرفه‌جویی در صنایع تبرید، کاری پیچیده و وقت‌گیر است. برای این کار باید با استفاده از روش‌های منطقی و سازمان یافته کلیه امکانات بالقوه را تحت بررسی قرار داد. در بسیاری از موارد سیستم‌های تبرید درصد قابل توجهی از هزینه برق یک واحد صنعتی را به خود اختصاص می‌دهند. به عنوان نمونه در برخی از سردخانه‌ها این مقدار به ۹۰ درصد می‌رسد. در جدول شماره (۱) شاخص‌هایی از درصد مصرف انرژی جهت سرماسازی برای چند بخش مختلف ارائه شده است. کسب آگاهی اولیه از سهم انرژی مورد نیاز جهت تبرید در یک واحد صنعتی، گام اولیه مهمی در جهت افزایش کارایی و کاهش هزینه عملیاتی آن واحد به شمار می‌رود. تخمین این هزینه‌ها در مرحله طراحی کار بسیار دشواری است چرا که این امر نیازمند درک دقیقی از نیازهای سرمایه سیستم و عوامل موثر بر افزایش کارایی سیستم تبرید است. اما باید توجه داشت که این تحلیل اولیه نقشی حیاتی در طراحی صحیح و کارآمد یک سیستم دارد.

جدول ۱- سهم انرژی مصرفی جهت تبرید در واحدهای مختلف صنعتی

درصد مصرف نمونه	زمینه فعالیت
۳۰	شیر و فرآورده‌های لبنی
۷۰	بستنی سازی
۵۰	گوشت، مرغ و ماهی
۷۰	میوه و سبزیجات یخ زده
۲۰	کاکائو، شکلات و شیرینی پزی
۳۰	نوشابه‌سازی
۹۰	سردخانه
۵-۳۰	* صنایع شیمیایی

(مقادیر بر اساس آمارگیری انجام شده از سوی گروه مشاورین March داده شده است)

تأسیسات تبرید صنعتی،

طراحی با هدف بهره‌وری انرژی

* به علت تنوع زیاد صنایع شیمیایی ارائه آمار دقیق بسیار مشکل است. در بعضی از بخش‌ها سهم انرژی تبرید بسیار قابل توجه است. این بخش‌ها شامل صنایع پتروشیمی، مواد شیمیایی معدنی، مواد شیمیایی بسیار خالص، صنایع دارویی و صنایع تولید رزین و پلاستیک می‌باشد.

۲-۱- طراحی با هدف افزایش کارآیی

امکانات بالقوه قابل توجهی برای بهبود طراحی سیستم‌های تبرید صنعتی وجود دارد. صرفه‌جویی‌های قابل توجهی تا حدود ۲۰ درصد قابل دستیابی بوده و از نظر بازگشت سرمایه اولیه نیز امکانات قابل قبولی وجود دارد. این صرفه‌جویی‌ها بر مبنای قیمت‌های سال ۱۹۹۱ بالغ بر چهل میلیون پوند می‌باشد. برای یک واحد صنعتی با اندازه متوسط که به عنوان نمونه، هزینه انرژی مورد نیاز آن جهت سرماسازی حدود یکصد هزار پوند در سال می‌باشد، صرفه‌جویی قابل توجهی به میزان یک هزار پوند در سال امکان‌پذیر است. یک دیدگاه قدیمی آن است که برای صرفه‌جویی در انرژی باید پول زیادی خرج کرد، اما واقعیت این است که همواره چنین نیست. همانطور که مثال (۱) به روشنی نشان می‌دهد گاه ممکن است با یک طراحی درست بتوان هم در مقدار انرژی مصرفی و هم در سرمایه اولیه مورد نیاز صرفه‌جویی نمود. در این مثال خاص، این امر از طریق کاستن بار سرمایی امکان‌پذیر شده است.

مثال ۱- صرفه‌جویی در مصرف انرژی با کاهش سرمایه اولیه

دستگاه‌های پاستوریزه کردن شیر و سایر نوشیدنی‌ها عموماً به طریق بازبایی مجدد انرژی کار می‌کنند.

شکل ۱- نمای شماتیک یک دستگاه پاستوریزه کردن شیر را نشان می‌دهد. در این دستگاه شیر از دمای 4°C تا دمای 72°C گرم می‌شود و به مدت چند ثانیه در لوله‌های مخصوص نگهداری و سپس مجدداً تا دمای 4°C سرد می‌شود. بخشی از این دستگاه که وظیفه بازبایی انرژی را انجام می‌دهد شیر گرم 72°C را با استفاده از سرمای شیر 4°C ورودی به سیستم، خنک می‌کند. اگر این امکان وجود داشت که از یک مبدل حرارتی بی‌نهایت بزرگ استفاده شود، دیگر نیازی به سرمایش و یا گرمایش اضافی نبود. اما در عمل برای گرم نمودن شیر تا درجه حرارت 72°C باید از آب داغ و جهت سرد کردن مجدد آن باید از آب سرد استفاده شود.

یک نکته کلیدی در طراحی، انتخاب صحیح نسبت تبرید است. وجود نسبت تبرید $0/85$ در دستگاه‌های پاستوریزه نمودن شیر، غیر معمول نیست. اما با افزایش سطح تبادل گرما غالباً می‌توان به طریق اقتصادی به این نسبت افزود. افزایش نسبت تبرید تا $0/93$ می‌تواند مقدار آب سرد مورد نیاز را تا 50% درصد کاهش دهد. در این حالت به جای آنکه دمای شیر از 14°C به 4°C رسانده شود، می‌توان آن را از دمای 9°C به 4°C رسانید. این امر در شکل (۱) نشان داده شده است.

در یک دستگاه پاستوریزه نمودن فرآورده‌های لبنی مایع، در صورت کم بودن نسبت تبرید بار گرمایی مورد نیاز حدود 50% درصد کل بار سرمایی خواهد بود. در یک مورد خاص، بهینه‌سازی نسبت تبرید، تاثیر اساسی در هزینه اولیه و هزینه‌های راهبری سیستم داشته است. به هنگام گسترش تاسیسات یک واحد تولید فرآورده‌های لبنی، کمبود قابل توجهی در ظرفیت تامین آب سرد مورد نیاز مشاهده گردید. پیمانکار آن طرح هزینه مورد نیاز جهت افزایش ظرفیت تبرید را به میزان $150,000$ پوند برآورد نمود. اما تجزیه و تحلیل‌های دقیق‌تر بعدی نشان داد که در آن سیستم نسبت تبرید بسیار کم بوده است. به این ترتیب کمبود ظرفیت تبرید سیستم، از طریق بهبود نسبت تبرید که هزینه سرمایه اولیه آن تنها $25,000$ پوند بود، مرتفع گردید.

به علت پیچیدگی فن آوری، تعدد حالات و انتخاب‌های ممکن که باید در جهت افزایش کارایی مورد بررسی قرار گیرد و همچنین به علت زمان زیادی که برای انجام محاسبات طراحی مورد نیاز می‌باشد، لازم است که طراح سیستم تبرید، روشی منطقی و سازمان یافته را در پیش گیرد.

شکل ۱- نمای شماتیک یک دستگاه نمونه برای پاستوریزه کردن شیر

اولین گام در طراحی یک سیستم با بازدهی خوب آن است که درک کاملی از بارهای سرمایی سیستم حاصل شود. بدیهی است برای حالتی که بار سرمایی چندانی وجود ندارد بحث بر سر طراحی یک سیستم تبرید کارآ، موردی ندارد و این نکته‌ای است که غالباً از نظرها پنهان می‌ماند. پس از عبور از مرحله تحلیل و درک بارهای سرمایی، نوبت به بحث روی سیستم

تبرید فرا می‌رسد. وقتی که سیستم بهینه شد آنگاه تک‌تک اجزای سیستم مورد بررسی بیشتر قرار گرفته و سرانجام کلیه نیازهای راهبری، تعمیر و نگهداری سیستم مورد نظر قرار می‌گیرند. برای شناخت بهترین حالات و انتخاب‌ها ممکن است لازم باشد که روند یاد شده در بالا چندین بار تکرار شود.

تقسیم نمودن تمهیدات لازم برای افزایش بازدهی به چهار مرحله اصلی، موجب می‌گردد که از فراموشی فرصت‌های مختلف جلوگیری شده و کلیه انتخاب‌های ممکن به ترتیب صحیحی مورد بررسی قرار گیرند. این چهار مرحله عبارتند از: طراحی فرآیند، طراحی سیستم، طراحی اجزاء و سرانجام تعیین چگونگی عملیات تعمیر و نگهداری و نحوه راهبری صحیح سیستم. این روش در شکل (۲) نمایش داده شده است.

۱-۳- ساختار این کتاب راهنما

هدف کلی این کتابچه راهنما این است که طراحان و خریداران سردکننده‌ها را در رسیدن به یک سیستم با بازدهی خوب یاری نماید. هدف دیگر آن است که راهبران سیستم را در ارزیابی سیستم‌های موجود و شناخت فرصت‌های بهتر برای بازسازی مجدد سیستم و کاهش هزینه‌های راهبری کمک نماید.

این کتابچه راهنما در پنج بخش اصلی تنظیم شده است:

بخش اول- کارآیی سیستم‌های تبرید

بخش دوم - فرصت‌های مختلف در طراحی فرآیند

بخش سوم - فرصت‌های مختلف در طراحی سیستم

بخش چهارم- طراحی اجزای سیستم تبرید

بخش پنجم - طراحی با هدف ایجاد سهولت در عملیات تعمیر، نگهداری و

راهبری سیستم

بخش اول: کارایی سیستم‌های تبرید

۲- نیازهای صنعتی

- بخش اول از این کتاب راهنما مشتمل است بر اطلاعات دقیقی درباره اصول پایه تبرید که سر فصل‌های زیر را پوشش می‌دهد:
- چرخه‌های تبرید (سیکل‌های تبرید)
 - تجهیزات کمکی
 - تجهیزات موثر بر کارایی
 - ضریب عملکرد (COP)^۱
 - بارهای سرمایی
 - دماهای تبخیر
 - دماهای تقطیر
 - بازدهی کمپرسور^۲

^۱- Coefficient Of Performance

^۲- Compressor

- توان کمکی
- طبقات عملکرد
- عملکرد در شرایط بار جزئی

شکل‌ها و مثال‌های متعددی در این کتاب راهنما وجود دارد که در کنار متن اصلی تکمیل می‌شوند. علاوه بر نکات یاد شده مسایل زیر نیز باید در نظر گرفته شوند:

۲-۱- انتخاب ماده مبرد

مبردهای کلروفلوئوروکربن (CFCها) و آمونیاک متداول‌ترین مبردهای به کار رفته در سیکل‌های تبرید هستند. در گذشته مبردها بر اساس مسایلی نظیر قیمت، کارایی در سیکل تبرید، سمی نبودن، قابلیت اشتعال و محدودیت‌های فشاری انتخاب می‌شدند (منظور از محدودیت‌های فشاری، میزان مجاز دمای تقطیر و همچنین جلوگیری از ایجاد خلاء در اواپراتور می‌باشد). اما «توافقنامه مونترال» محدودیت‌های جدیدی را در انتخاب مبردها وضع نموده است و بر این اساس تولید چند نوع مبرد (شمال R12 و R11 و R502) از سال ۱۹۹۶ به بعد در انگلستان متوقف شده است. مبردهای جدیدی در دست مطالعه و ساخت هستند (مثلاً مبردهای R123، R134a) که آثار مخرب کمتری بر لایه ازن داشته و ممکن است که در آینده به عنوان مبردهای جایگزین تثبیت شوند.

ضریب عملکرد لزوماً مهمترین عامل در انتخاب مبردها نمی‌باشد. اگر هزینه اولیه محدودیت اصلی باشد (که معمولاً نیز چنین است) آنگاه اندازه کمپرسور (یعنی حجم جاروب شده آن) به عنوان موضوع اصلی مورد بحث، مطرح می‌گردد. البته هنگام طراحی جهت کاهش هزینه راهبری سیستم نیز بهتر است که انواع مبردهای مجاز، مورد نظر قرار گرفته و سرانجام با

صرفه‌ترین نوع مبرد انتخاب گردد.

۲-۲- نوع چرخه کاری سیکل تبرید

نوع چرخه کاری تبرید می‌تواند تاثیر زیادی در کارایی داشته باشد. اگرچه چرخه‌های تک مرحله‌ای معمولترین چرخه‌های کاری هستند، اما در مواردی که دمای تبخیر مورد نیاز خیلی کم است (مثلاً کمتر از 20°C -) و یا هنگامی که ساعات کارکرد سیستم خیلی طولانی است، چرخه‌های دو مرحله‌ای انتخاب‌های بهتری خواهند بود.

۲-۳- سایر مسایل مهم در طراحی

سایر مسایلی که علاوه بر هزینه‌های اولیه و راهبری سیستم باید هنگام طراحی مدنظر قرار گیرند، عبارتند از:

- اثرات زیست محیطی

- هزینه‌های تعمیر و نگهداری

- قابلیت اطمینان

- ایمنی

- سهولت و سرعت به کارگیری سیستم

لازم به تاکید است که افزایش کارایی لزوماً تاثیر منفی بر هیچ یک از عوامل فوق نخواهد داشت و نباید رعایت این موارد به عنوان توجیهی جهت بازدهی کم سیستم مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۴- اهمیت تجزیه و تحلیل بار سرمایی

در مرحله طراحی یک سیستم تبرید و یا هنگام بررسی تناسب یک سیستم برای یک کاربرد خاص، لازم است که از میزان حداکثر بار سرمایی

مورد نیاز اطلاع حاصل گردد. وجود یک درک دقیق‌تر از بارهای سرمایی به طراح این امکان را می‌دهد که:

- فرصت‌های محتمل جهت کاهش و یا حذف بارهای سرمایی را مورد بررسی قرار دهد؛
- درجه حرارت‌های سیستم تبرید را در سطوح مختلف بهینه نماید؛
- کمپرسورها را از نظر اندازه و کنترل مورد نیاز بررسی و انتخاب نماید؛
- به ایده‌های جدیدی برای صرفه‌جویی، همانند انتخاب کمپرسورهای بهتر، انتخاب مبدل‌های حرارتی بزرگتر، تغییر ذخیره حرارت و سایر موارد، دست یابد.

۲-۵- جمع آوری اطلاعات

جمع آوری اطلاعات لازم درباره نیازهای سرمایه‌ی سیستم همیشه کار ساده‌ای نیست. برای هر یک از بارهای سرمایه‌ی رشته‌ای از اطلاعات مورد نیازند. این اطلاعات در جدول (۲) خلاصه شده‌اند.

جهت تجزیه و تحلیل صحیح لازم است که رشته‌ای از اطلاعات مربوط به بارهای سرمایه‌ی در دست باشد. برای جمع آوری این اطلاعات لازم است که در شروع درکی نسبتاً دقیق از فرآیندی که نیاز به خنک‌کاری دارد به دست آید. اگر امر تعیین اندازه و انتخاب طرح به عهده پیمانکارانی گذارده شود که اطلاعات قابل اتکایی از بارهای سرمایه‌ی ندارند، آنگاه ممکن است که یک سیستم غیرکارآخربرداری و نصب گردد.

جدول ۲- رشته اطلاعات مورد نیاز

- حداکثر بار سرمایه‌ی مورد نیاز
- تغییرات بار سرمایه‌ی مورد نیاز
- زمان سنجی نیازهای سرمایه‌ی
- طول مدت نیازهای سرمایه‌ی
- دماهای اولیه و نهایی مایعات و جامدات سرد شونده
- سایر اطلاعات (مانند محدودیت‌های واسط در خنک‌کاری،
- عدم قاطعیت در شرایط کارکرد و غیره)

مهمترین منابع برای جمع آوری این گونه اطلاعات، بحث و تبادل نظر با افراد

کلیدی، مدیر تولید، سایر مهندسين و افرادی از این قبیل می‌باشد.

۲-۶- انواع بارهای سرمایی

بارهای سرمایی صنعتی را می‌توان به دسته‌های زیر تقسیم نمود:

- بارهای محسوس، یعنی سرمای مورد نیاز جهت سرد کردن مایعات و جامدات
- بارهای نهان، که صرف انجماد و یا تقطیر می‌شود
- گرمای حاصل از فرآیندها، مانند گرمای ناشی از ترکیب مواد شیمیایی و یا تخمیر مواد
- تلفات عایق سردخانه‌ها، لوله‌ها، مخازن و غیره
- نفوذ از درزها، همانند درز درهای سردخانه
- منابع فرعی، پنکه‌های اواپراتور، پمپ‌های آب سرد و غیره
- سایر منابع گرمایی، مانند افراد و کامیون‌های تردد کننده در سردخانه‌ها و غیره.

بارهای سرمای محسوس

بارهای سرمای محسوس صرف کاهش دمای محصولات می‌گردد بدون آنکه موجب تغییر حالت آنها شود. مثال‌های این مورد شامل سرمای مورد نیاز برای سرد کردن آب، هوا و یا فرآورده‌ها می‌باشد. مقدار بار سرمای محسوس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = mc_p (T_i - T_f) \quad \text{معادله ۱}$$

که در این رابطه:

$$Q = \text{بار سرمایی (kw)}$$

$$m = \text{جریان جرمی (kg/s)}$$

$c_p =$ ظرفیت گرمایی ویژه (KJ / Kg°C)

$T_i =$ دمای اولیه محصول (°C)

$T_f =$ دمای نهایی محصول (°C)

ظرفیت گرمایی ویژه با دما تغییر می‌کند، اما غالباً می‌توان آن را با یک مقدار ثابت متوسط تقریب زد. مقادیر ظرفیت گرمایی ویژه برای مواد معمولی را می‌توان از منابع استاندارد مهندسی و تبرید به دست آورد (به پیوست ۱ رجوع کنید).

بارهای سرمای نهان

مقدار گرمای آزاد شده از مواد را به هنگام تقطیر، انجماد و یا ذوب، بار سرمای نهان می‌نامند. گرمای نهان تغییر حالت^۳ عبارت از مقدار گرمای مورد نیاز برای تبدیل یک مایع به جامد و یا بالعکس است. انجماد یا ذوب در دمایی که آن را دمای انجماد یا ذوب می‌نامند صورت می‌گیرد. دمای تغییر حالت به کندی با فشار تغییر می‌کند. گرمای نهان تبخیر، مقدار انرژی مورد نیاز برای تغییر حالت یک گاز به مایع یا بالعکس است. تقطیر و تبخیر (جوشش) تحت دمایی صورت می‌گیرد که به میزان زیادی به فشار بستگی دارد. بار سرمای نهان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \text{معادله ۲} \text{ mL}$$

$Q =$ بار سرمایی نهان (Kw)
 $m =$ جریان جرمی (kg/s)
 $L =$ گرمای نهان ویژه (kJ/kg)

مقادیر مربوط به نقاط انجماد، دماها و فشارهای اشباع و گرماهای نهان تغییر حالت و تبخیر را می‌توان از منابع استاندارد به دست آورد (به پیوست ۳ رجوع کنید).

گرمای ناشی از واکنش‌ها

واکنش‌ها (همانند تخمیر یا واکنش‌های شیمیایی) یا گرمازا هستند و یا

³ - Fusion

گرماگیر. در یک فرآیند که نیاز به خنک شدن دارد لازم است کلیه منابع گرمایی از جمله گرمای ناشی از واکنش‌ها را در محاسبه بار سرمایی مورد نظر قرار داد. گرمای ناشی از واکنش‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \frac{m}{M} \Delta H \quad \text{معادله ۳}$$

که در این رابطه:

$$\begin{aligned} Q &= \text{بار سرمایی} \quad (\text{kW}) \\ m &= \text{جرم جرمی عامل واکنش یا محصول} \quad (\text{Kg/s}) \\ M &= \text{جرم مولکولی نسبی} \quad (\text{kg/mol}) \\ \Delta H &= \text{انتالپی واکنش} \quad (\text{kJ/mol}) \end{aligned}$$

انتالپی واکنش زمانی که پدیده از نوع گرمازا است منفی و هنگامی که پدیده از نوع گرماگیر است، مثبت می‌باشد. در حالتی که واکنش گرماگیر است، ممکن است بار سرمایی سیستم عملاً کمتر از حالتی باشد که واکنشی در سیستم صورت نمی‌پذیرد.

عایق کاری

بار سرمایی حاصل از عایق کاری در سردخانه‌ها، اتاق‌های خنک یا محل‌هایی که دارای تهویه مطبوع هستند، ممکن است کاملاً قابل توجه باشد. این گونه بار سرمایی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Q = U A (T_2 - T_1) \quad \text{معادله ۴}$$

که در این رابطه:

$$Q = \text{بار سرمایی} \quad (\text{kW})$$

$$U = \text{ضریب انتقال حرارت} \quad (\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$A = \text{سطح عبور گرما} \quad (\text{m}^2)$$

$$T_1 = \text{دمای طرف سرد} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_2 = \text{دمای طرف گرم} \quad (^\circ\text{C})$$

مقدار "U" بستگی به ضریب هدایت حرارتی عایق به کار رفته (دیوار، سقف، کف و غیره) و ضخامت عایق دارد:

$U = \frac{K}{L}$	معادله ۵
-------------------	----------

که در این رابطه :

$$U = \text{ضریب انتقال حرارت} \quad (\text{kW} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$K = \text{ضریب هدایت حرارتی عایق} \quad (\text{kW} / \text{m} \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$L = \text{ضخامت عایق} \quad (\text{m})$$

برای یک دیوار یا سقف مرکب، مقدار "U" باید بر اساس ضخامت و ضریب هدایتی هر یک از اجزاء محاسبه گردد. مقدار "k" و "U" برای طیف وسیعی از مواد و مصالح ساختمانی در کتاب‌های استاندارد منتشر شده است.

دمای قسمت داخلی (طرف سرد) در یک سردخانه، عموماً در طول سال مقدار ثابتی دارد. اما دمای خارج (طرف گرم) با تغییر فصل عوض می‌شود. اثر تغییرات دمای محیط خارج را لازم است در محاسبه حداکثر بار سرمایی سیستم مد نظر قرار داد. اگر ساختمانی که تحت سرمایش است در معرض تشعشع مستقیم خورشید قرار دارد، لازم است که دمای طرف گرم (T_2) را بیشتر از حد معمول دمای محیط فرض نمود. دمای اضافی یاد شده بستگی

به فصل، ضریب انتشار و جهت قرار گرفتن سطح مورد نظر دارد. این درجه حرارت را اصطلاحاً "دمای هوای آفتابی" می‌نامند. مقادیر دمای هوای آفتابی را می‌توان از کتاب‌های استاندارد استخراج نمود. بار سرمایی برای سردخانه‌های بزرگ را می‌توان در مرحله طراحی کاهش داد، به این ترتیب که جهت قرارگیری ساختمان و یا مواد پوشاننده آن به نوعی انتخاب شوند که مقدار گرمای جذب شده از خورشید کمتر شود.

لوله‌ها و مخازن حاوی مواد مبرد نیز به نحو قابل ملاحظه‌ای بار سرمایی سیستم را افزایش می‌دهند. روش برخورد با این دو مسأله مشابه است.

نفوذ هوا از درزها

بارهای سرمایی ناشی از نفوذ هوای گرم از محل درزها به محیط تحت سرمایش، ممکن است کاملاً قابل ملاحظه باشد. این مسأله، به خصوص در سردخانه‌ها حایز اهمیت است. سرمایی که باید صرف یخ زدن رطوبت وارده از طریق هوای گرم شود و متعاقباً گرمایی که باید جهت انجام عمل برفک‌زدایی به سیستم اضافه شود، در مجموع بار سرمایی سیستم را افزایش می‌دهند. بار سرمایی حاصل از نفوذ هوا از درزها را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$Q = m(h_i - h_f) \quad \text{معادله ۶}$$

که در این رابطه:

$$Q = \text{بار سرمایی} \quad (\text{Kw})$$

$$m = \text{جریان جرمی هوای ورودی} \quad (\text{kg/s})$$

$$h_i = \text{انتالپی اولیه هوای ورودی} \quad (\text{kJ/kg})$$

$$h_f = \text{انتالپی نهایی هوای ورودی} \quad (\text{kJ/kg})$$

مقدار انتالپی را می‌توان با توجه به دما و رطوبت نسبی داخل و خارج اتاق سرد با استفاده از جداول و منحنی‌های مشخصات هوا^۴ به دست آورد. یکی از منابع اولیه نفوذ هوا به داخل سردخانه‌ها از طریق درب‌های باز است. به محض باز شدن درب یک سردخانه، نمیرخ توزیع سرعت هوا در عرض درب ایجاد می‌شود به این ترتیب که هوای سرد که سنگین‌تر است از نیمه پایین‌تر خارج و هوای گرم که سبک‌تر است از نیمه بالایی وارد اتاق سرد می‌شود. (شکل ۳).

^۴ - Psychrometric Chart

شکل ۳ - نفوذ هوای گرم به اتاق سرد از طریق یک درب باز

نفوذ هوا از طریق درب‌ها را می‌توان با انتخاب درب‌های حتی‌المقدور کم ارتفاع، کاهش زمان باز بودن درب‌ها (با استفاده از درب بندهای خودکار) و استفاده از پرده‌های نواری و هوایی کاهش داد. محاسبه این گونه بارهای سرمایی بدون استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای غالباً دشوار است، اما در بعضی از کتاب‌های استاندارد می‌توان روابطی را برای محاسبه آن به دست آورد. (به پیوست ۱ رجوع کنید).

بارهای سرمایی فرعی

بارهای سرمایی فرعی معمولاً به واسطه وجود پنکه‌ها، چراغ‌ها، ماشین آلات تولید، تجهیزات برفک‌زدایی و همانند اینها در فضاهای تحت سرمایش و همچنین توزیع مایعات سرد به وجود می‌آید. بار سرمایی لازم جهت خنثی نمودن گرمای حاصل از این منابع به میزان توانی بستگی دارد که هر یک از این دستگاه‌ها مصرف می‌نمایند. درک این نکته حائز اهمیت است که بارهای گرمایی اینگونه منابع از دیدگاه انرژی ضروری چندگانه دارد. به این ترتیب که برای به کار انداختن این دستگاه‌ها باید انرژی مصرف شود و برای از بین بردن گرمای ناخواسته حاصل از آنها نیز باید انرژی اضافی دیگری مصرف نمود. غالباً کاهش بار دستگاه‌های فرعی بسیار مقرون به صرفه خواهد بود.

۲-۷- تفکیک بارهای سرمایی

”رشته اطلاعات“ یاد شده در بخش (۲-۵) می‌تواند برای محاسبه

نیازهای سرمایش سالانه هر یک از منابع گرما به کار گرفته شود. از این اطلاعات می‌توان برای شناسایی منابع گرمایی مهم‌تر استفاده نمود. بررسی‌های دقیق‌تر این دسته از منابع حرارتی روشن خواهد ساخت که چگونه می‌توان از میزان بار سرمایشی ناشی از آنها کاست.

۲-۸- نمودار بارهای سرمایی

محاسبه نمودار بارهای سرمایی، اطلاعات ارزشمندی را به طراح می‌دهد. یک نمونه از این نمودارها در شکل (۴) نشان داده شده است. از این نمودارها برای تعیین اندازه بهینه سیستم و همچنین جهت ملاحظه فرصت‌های احتمالی از نظر ذخیره حرارت^۵ در سیستم، می‌توان بهره برد.

۲-۹- نمودار نمایش حدهای درجات حرارت

یکی از بهترین موارد استفاده از اطلاعات بارهای سرمایی در مرحله طراحی و ارزیابی، تعیین حدهای مختلف درجات حرارت در سیستم تبرید است.

(۵) نمودار بار سرمایی کلی سیستم (یعنی کل انرژی گرفته شده از سیستم) را به ازای هریک درجه سانتی‌گراد کاهش دما و برای کلیه بارهای حرارتی موجود در سیستم نمایش می‌دهد. این نمودار درجه حرارت‌هایی را که باید عمل سردسازی در آنها صورت گیرد نمایش می‌دهد. وجود یک مساحت بزرگ زیر بخش‌هایی از نمودار نمایانگر آن است که در آن محدوده از درجه حرارت توان سرمایی زیادی مورد نیاز است.

در این مثال خاص، نمودار نشان می‌دهد که نیازهای سرمایی در دوحد

⁵ - Thermal Storage

درجه حرارت (بیش از 10°C و نیز بیش از -5°C) متمرکز شده است. ممکن است برای شرایط نشان داده شده، استفاده از دو سیستم تبرید جداگانه، مناسبتر باشد که به عنوان نمونه یکی از آنها در درجه حرارت تبخیر معادل -10°C و دیگری در درجه حرارت تبخیر 0°C به کار گرفته شود. استفاده از دو سیستم یاد شده به مراتب بسیار بهتر از آن است که بخواهیم سیستمی را که برای -10°C مناسب است برای کلیه بارهای سیستم به کار گیریم. حتی از نظر هزینه ساخت دستگاه نیز ممکن است استفاده از دو سیستم جداگانه در این مورد مقرون به صرفه‌تر باشد. معمولاً بهتر است که محاسبه و رسم نمودارهای نمایانگر بار سرمایی و درجه حرارت از طریق نرم‌افزارهای رایانه‌ای انجام پذیرد. البته انجام این امر به طریقه دستی نیز امکان‌پذیر است. روش‌های مربوط به محاسبه این نمودارها در پیوست (۲) آورده شده است.

شکل ۵ - نمودار میزان نیازهای سرمایی هفتگی در حدود مختلف درجات حرارت

۲-۱۰- حد‌های درجات حرارت

اگر هدف، بیشینه نمودن کارایی یک سیستم تبرید باشد آنگاه لازم است که تبخیر مبرد در اتاق سرد در حداکثر درجه حرارت ممکن انجام پذیرد. گاه می‌توان فرآیند تحت تبرید را به نوعی تغییر داد که عمل سردسازی در درجه حرارت بالاتری صورت گیرد (به عنوان مثال با رفع نیاز به یک مبرد ثانویه).

۲-۱۱- تکنولوژی تجمیع (Pinch)

این فن آوری که آن را تجمیع فرآیند تحت تبرید نیز می‌نامند، روشی

دقیق و سازمان یافته است که بر اساس آن می‌توان نیازهای گرمایشی و سرمایشی فرآیند تحت تبرید را بهینه نموده و این امکان را فراهم آورد که تبرید در درجه حرارت بالاتری صورت گیرد. خوانندگان علاقمند به این بحث می‌توانند به کتاب‌های استاندارد مراجعه کنند. این روش معمولاً در مورد کارخانجات و صنایع شیمیایی پیچیده‌تر کارایی بهتری را نشان می‌دهد.

۳- خلاصه بخش اول: کارایی سیستم تبرید

* درک کامل بارهای سرمایی امکان شناسایی فرصت‌های احتمالی برای حذف یا کاهش بار سرمایی، بهینه‌سازی، حدهای مختلف دمای تبخیر، انتخاب صحیح و اندازه مناسب کمپرسورها و ارزیابی صحیح، فرصت‌های احتمال جهت صرفه‌جویی در انرژی را فراهم می‌آورد.

* محاسبه و تفکیک بارهای سرمایی به اجزاء امکان اولویت‌بندی منابع بارهای سرمایی را فراهم می‌آورد. اولویت اصلی با بارهایی است که یا از نظر مقدار سیار قابل توجه هستند و یا آنکه احتمال زیادی وجود دارد که بتوان آن بارها را به سادگی کاهش داد.

* نمودارهای نمایش دهنده بار سرمایی و حدهای درجه حرارت تبخیر برای تعیین اندازه‌های طرح، شناسایی امکان ذخیره انرژی و بهینه‌سازی حدهای دمای تبخیر، از ارزش زیادی برخوردار هستند.

* اگر منظور افزایش کارایی یک سیستم تبرید باشد، آنگاه انجام تبخیر مبرد در حداکثر دمای ممکن تأثیری حیاتی پیدا می‌کند.

بخش دوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

۴- کاهش بار گرمایی

همچنانکه در مقدمه گفته شد، فرصت‌های افزایش کارایی سیستم‌های تبرید را می‌توان به سادگی به چهار دسته تقسیم بندی نمود. اولین فرصت، طراحی فرآیند است. در این بخش به دنبال فرصت‌هایی باید بود که امکان کاهش بارهای سرمایی را فراهم می‌آورند و پس از آن می‌توان حدهای مناسب درجه حرارت‌های تبخیر را به دست آورد. همواره باید کار را از طراحی صحیح یک فرآیند تحت تبرید آغاز نمود، زیرا منطقی به نظر نمی‌رسد که وقت زیادی برای طراحی یک سیستم تبرید صرف شود در حالی که بسیاری از بارهای سرمایی آن سیستم عملاً قابل حذف و یا کاهش می‌باشند. فرصت‌های کاهش بار را می‌توان به گروه‌های زیر تقسیم نمود:

- کاهش بارهای گرمایی
- سردسازی طبیعی
- حدهای درجات حرارت

فرصت‌های موجود در طراحی و یا تغییر فرآیند تحت کنترل عموماً از دیدگاه پیمان‌کاران سیستم‌های تبرید به دور می‌ماند و این به دلیل آن است که معمولاً چنین وظیفه‌ای به عهده آنها گذارده نمی‌شود. این امر در طراحی صحیح یک سیستم تبرید آنقدر نقش حیاتی دارد که هر چه بر آن تأکید شود باز کم است.

اولین فرصت در طراحی فرآیند کاستن بارهای گرمایی حاصل از آن بر روی سیستم تبرید است. بار کلی سرمایی متشکل است از بارهای حاصل از

اجزای فرآیند (مانند سرد سازی نوشابه‌ها، واکنش‌های شیمیایی و تقطیر بخار) و سایر بارهای فرعی (مانند پمپ مبرد ثانویه اوپراتور، چراغ‌ها و پنکه‌های سردخانه‌ها، بارهای ناشی از عبور گرما از عایق‌بندی‌ها و نفوذ هوا از درب‌ها و یا درزها و غیره). در بسیاری از موارد بررسی دقیق این بارها امکان کاهش آنها را نشان خواهد داد. به عنوان مثال:

- بار گرمایی ناشی از عایق جداره‌های اتاق، لوله‌ها و مخازن را می‌توان با افزودن ضخامت عایق‌کاری و یا بهسازی موانع ورود رطوبت به سیستم کاهش داد.

- نفوذ هوای گرم به داخل سردخانه‌ها را می‌توان با کاهش تعداد و اندازه درب‌ها تا حد امکان و همچنین با نصب سیستم‌های خودکار جهت بستن درب‌ها و پرده‌های نواری و یا هوایی کاهش داد.

- پنکه‌های فرعی، پمپ‌ها، چراغ‌ها و سایر منابع گرمایی را می‌توان در مواقع غیر لازم به صورت خودکار خاموش نمود و یا آنکه از موتورهای دور متغیر استفاده کرد. (به مثال‌های ۲، ۳ و ۴ مراجعه کنید).

مثال ۲ : استفاده از موتورهای دور متغیر برای پمپ‌های

توزیع مبرد

پمپ‌های توزیع گلیکول در یک کارخانه تولید ماء‌الشعیر، مایع گلیکول سرد با دمای 7°C - را به نقاط مختلف واحد، هدایت می‌کنند. بیشترین نیازهای سرمایی به مخازن بزرگ تخمیر اختصاص دارد.

در حین انجام عمل تخمیر، گرمایی تولید می‌شود که باید از سیستم خارج شود. در مراحل نهایی تولید باید محصول را تا حد ایجاد ذرات یخ سرد نمود، یعنی باید دمای آن از 20°C به نزدیک 0°C رسانده شود. چون فرآیند درون حدود 20 مخزن صورت می‌گیرد، بار سرمایی سیستم در اغلب لحظات غیرقابل پیش‌بینی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. زمانی که یک مخزن نیاز به سرمایش دارد، شیرهای گلیکول باز شده و اجازه می‌دهند که مایع سرد در جداره خارجی مخزن به حرکت درآید. وقتی که درجه حرارت مایع درون مخزن به حد از پیش تعیین شده رسید، شیرهای گلیکول بسته می‌شوند.

پمپ‌های گلیکول باید بار سرمایی سیستم را که تغییراتی زیاد و مداوم دارد از طریق فرستادن مقادیر مناسبی از گلیکول سرد و با حفظ حداقلی از فشار که برای رفع نیازهای سرمایی سیستم لازم است، تأمین نمایند. نصب موتورهایی با دور متغیر

برای به گردش درآوردن پمپ‌ها این امکان را فراهم می‌کند که با هزینه اولیه ۴۰۰۰۰ پوند، سالانه به میزان ۲۵۰۰۰ پوند در یک کارخانه سازندهٔ ماءالشعیر صرفه‌جویی به عمل آید. در این طرح دورموتورها به نحوی تغییر داده می‌شود که ضمن حفظ فشار تغذیه گلیکول، کلیه نیازهای سرمای‌سیستم در کلیه شرایط تأمین شود.

مثال ۳: پمپ‌های دو سرعت در سردخانه‌ها

پمپ‌ها بزرگترین مصرف‌کننده‌های برق در یک سردخانه بزرگ بوده‌اند و هزینه برق مصرفی آنها بالغ بر ۳۰۰۰۰ پوند در سال می‌شد. به علاوه گرمای حاصل از آنها مبلغی معادل ۱۵۰۰۰ پوند دیگر را به هزینه‌های کاری سیستم تبرید اضافه می‌نمود. زمانی که سردخانه‌ای با درجه حرارت مطلوب سرد شده باشد می‌توان با کاستن از سرعت پمپ‌ها در مصرف برق و بارگرمایی حاصله کاهش قابل ملاحظه‌ای ایجاد نمود.

موتورهای دو سرعت‌ای با حذف هزینه ۴۵۰۰۰ پوند در سردخانه نصب گردید که از محل صرفه‌جویی‌های حاصله، سرمایه‌گذاری اولیه ظرف ۲ سال بازگردانده شد.

مثال ۴: اتاق سرد نگهداری ماء‌الشعیر

در یک کارخانه تولید ماء‌الشعیر، این نوشیدنی‌ها در مخازن خاصی که در اتاق‌های سرد قرار دارند نگهداری می‌شوند. دمای این اتاق‌های بین $^{\circ}\text{C}$ تا 7°C است. سرمای مورد نیاز در این اتاق‌ها توسط سردکننده‌های هوایی که بامبرد آمونیاک تغذیه می‌گردند، تأمین می‌شود. گاهی نیز برای این کار از مبردهای ثانویه‌ای مانند گلیکول استفاده می‌شود. در یکی از کارخانه‌ها، آزمایش‌های انجام شده نشان داد که ضریب عملکرد سیستم تبرید برابر با ۳ است. به عبارت دیگر به ازای هر 10kW توان مصرفی جهت روشنایی سردخانه، کمپرسورها $3/3\text{kW}$ بیشتر برق مصرف می‌کنند. برای حذف گرمای حاصل از چراغ‌ها، سایر وسایل جانبی (مانند پنکه‌های کندانسور و پمپ‌ها) نیز حدود $1/7\text{kW}$ به مصرف برق کمپرسور می‌افزایند. بنابراین به ازای هر 10kW روشنایی، حدود 15kW به مصرف برق کمپرسور افزوده می‌شود. مجموع بار حرارتی حاصل از چراغ‌ها در اتاق‌های سرد حدود 30kW تخمین زده شد، یعنی کل انرژی الکتریکی مصرفی اضافی در کمپرسور به 45kW بالغ می‌گردد. چراغ‌ها از نوع مهتابی و همواره روشن بودند و به این ترتیب هزینه سالانه به حدود ۱۲۰۰۰ پوند می‌رسد.

تعویض چراغ‌های یاد شده با چراغ‌های سدیم و یا مهتابی

بخصوصی که کارآیی بیشتری دارند نه تنها به میزان زیادی در هزینه برق، بلکه در هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد می‌کند. اما از آنجا که اتاق‌ها هرازگاهی مورد استفاده کارکنان قرار می‌گرفت، استفاده از کنترل کننده‌هایی که چراغ‌ها را در مواقع غیر لازم خاموش می‌کنند به نظر ارزان و در عین حال با صرفه به نظر می‌آمد.

کنترل کننده‌های حساس به قیمت ۲۵۰۰۰ پوند پیشنهاد گردید تا به عنوان کنترل کننده چراغ‌ها مورد استفاده قرار گیرد و به این ترتیب سالانه ۸۰۰۰ پوند صرفه‌جویی در مصرف برق حاصل شد و سرمایه‌گذاری اولیه ظرف مدت ۳ سال به سوددهی رسید.

۵- سردسازی طبیعی

به طور کلی سه روش جهت سردسازی جریان یک فرآیند و یا دیگر بارهای گرمازا وجود دارد:

• تبرید مکانیکی

• سردسازی طبیعی با محیط؛ که در این روش یک محصول داغ را با استفاده از هوای سرد خارج از کارخانه (محیط اطراف) خنک می‌کنند.

• سردسازی طبیعی با استفاده از محصولی دیگر؛ که در این روش دو جریان فرآیند را که نیاز به گرما و سرما دارند از جداره‌های مجاور در یک مبدل حرارتی عبور می‌دهند تا بتوانند با یکدیگر تبادل حرارت نمایند.

موارد یاد شده در دسته‌بندی بالا به ترتیبی فهرست شده‌اند که از بالا به پایین، هم هزینه عملیاتی و هم سرمایه اولیه آنها کاهش می‌یابد. تبرید به مصرف مقدار زیادی انرژی الکتریکی نیاز دارد و نصب آن پیچیده و هزینه‌بر است. سردسازی با استفاده از محیط معمولاً به یک پمپ و یا پنکه نیاز دارد، اما توان مصرفی آن ممکن است تنها ۱۰٪ توان مصرفی سیستم‌های تبرید مکانیکی باشد. سرمایه‌گذاری اولیه آن نیز در مقایسه با تبرید مکانیکی کمتر است، زیرا در این روش نیازی به کمپرسور نیست و سطح مبدل‌های حرارتی نیز کمتر است. سردسازی یک جریان فرآیندی به کمک جریان فرآیندی دیگری که نیاز به گرمایش دارد، معمولاً مؤثرترین راه می‌باشد. هزینه‌های راهبری نیز قابل صرف‌نظر کردن و معمولاً منفی است، زیرا موجب کاهش سوخت مصرفی مورد نیاز برای گرم کردن جریان‌های گرماگیر فرآیند می‌شود. سرمایه‌گذاری اولیه نیز بسیار اندک است، زیرا یک مبدل حرارتی به تنهایی قادر است هر دو وظیفه سرمایش و گرمایش جریان‌های فرآیندی طرح را به خوبی انجام دهد.

روشن است که میزان استفاده از سردسازی طبیعی باید به حداکثر

ممکن برسد. منافع این امر به ویژه در مورد واحدهای صنعتی جدید در کاهش سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های راهبری بعدی قابل توجه است. در مورد واحدهای صنعتی موجود نیز ممکن است هزینه‌های اضافی برای تغییر سیستم به نحوی عالی در زمان کوتاه بازگردد.

۵-۱- چگونه فرصت‌های ممکن برای سردسازی طبیعی را شناسایی کنیم؟
در بعضی موارد می‌توان با استفاده از سردسازی طبیعی، یک بار سرمایی خاص را به طور کامل حذف نمود. در موارد دیگر نیز می‌توان درجه حرارت را با استفاده از این شیوه تا حدودی کاهش داد و از آن پس برای رسیدن کامل‌تر به درجه حرارت مطلوب از تبرید مکانیکی استفاده نمود. دسته سوم از این موارد آن است که ممکن است بتوان در طول مدت قابل توجهی از سال با استفاده از سردسازی طبیعی یکی از بارهای سرمایی را به طور کامل حذف نمود و یا کاهش داد و تنها در بخشی از سال از تبرید مکانیکی استفاده کرد.

اگر چه ارائه پیشنهادها برای سردسازی طبیعی کار دشواری نیست، اما بدیهی است که قبل از هر چیز باید به بررسی روش‌های مختلف این امر پرداخت. برای شناسایی بهترین فرصت‌ها، عموماً استفاده از یک روش منطقی کارساز است. پیشنهاد می‌شود که این کار در سه مرحله، شامل تعریف جریان فرآیند، تطابق درجه حرارت فرآیند و ارزیابی محدودیت‌های کار انجام پذیرد.

پیش از توضیح این مراحل، ابتدا بهتر است تعدادی از اصول سرانگشتی ساده و مفید که به کمک آنها می‌توان جریان‌هایی با امکان سردسازی

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

- طبیعی را به سرعت شناسایی نمود، معرفی شود. این اصول مربوطند به :
 - جریان‌های بسیار گرم؛ در صورتی که جریان محصولی که نیازمند سردسازی است بسیار گرم باشد، (یعنی در تمام یا قسمتی از طول سال، دمای آن به قدر کافی از دمای محیط بالاتر باشد) فرصتی جهت سردسازی طبیعی محسوب می‌شود.
 - نیازهای سرمایی با محدوده گسترده؛ در صورتی که سردسازی سیالی در محدوده گسترده‌ای از تغییرات دما مورد نیاز باشد، آنگاه ممکن است بتوان بخشی از خنک‌کاری را به طور طبیعی انجام داد.
 - جریان‌های سرد؛ هر جریانی که نیازمند کسب گرما از یک منبع با درجه حرارت کمتر یا نزدیک به دمای محیط باشد را می‌توان به عنوان یک واسط مناسب جهت سردسازی طبیعی محصولات دیگر تلقی نمود.

تعریف جریان‌ها

- سه نوع از جریان‌های فرآیند باید تحت شناسایی قرار گیرند:
 - جریان محصولاتی که نیاز به سرمایش دارند؛
 - جریان محصولاتی که نیاز به گرمایش دارند؛
 - جریان‌هایی که امکان بالقوه‌ای جهت سردسازی از طریق محیط دارند. در مورد هر جریان اطلاعاتی به شرح زیر باید فهرست شوند:
 - دمای اولیه °C ؛
 - دمای نهایی °C ؛
 - کل بار سرمایشی kW؛
 - نوع و حالت موادی که باید خنک یا گرم شوند (جامد، مایع یا گاز)؛
 - تغییرات فصلی دما یا بارهای سرمایی و گرمایی؛
 - سرمایش مورد نیاز بر حسب تعداد ساعات در هفته؛

• محل قرار گرفتن بار.

تطابق دمای جریان‌ها

دمای جریان‌های نیازمند سردسازی را باید با دمای جریان‌های طبیعی موجود برای سردسازی منطبق ساخت. این امر را نخست باید بر سطوح دما اعمال نمود. یکی از فرصت‌های این تطابق، زمای روی می‌دهد که جریان سردساز طبیعی، سردتر از جریانی باشد که به خنک‌سازی نیازمند است. این فرصت‌ها را باید در سه گروه طبقه‌بندی نمود:

• فرصت‌هایی با امکان سردسازی طبیعی کامل برای کل طول سال؛

• فرصت‌هایی با امکان سردسازی جزئی در طول سال؛

• فرصت‌هایی با امکان سردسازی کلی یا جزئی برای مقطعی از سال.

برای برقراری جریان گرمایی همواره باید اختلاف دمایی میان جریان‌ها وجود داشته باشد. مقدار این اختلاف دما وابسته به طبیعت جریان مورد نظر است. به عنوان نمونه سردسازی طبیعی مایعی توسط مایعی دیگر نیاز به حداقل 4°C اختلاف دما دارد، در حالی که برای جریان سردسازی یک گاز توسط جریان گازی دیگر حداقل اختلاف دمای اقتصادی مورد نیاز بین 10°C تا 15°C است. همچنین باید به خاطر داشت که سردسازی طبیعی را می‌توان در چند مرحله انجام داد. به عنوان مثال می‌توان جریان ناشی از یک محصول را ابتدا توسط جریان محصولی دیگر خنک نمود و سپس توسط آب خنک طبیعی و در نهایت توسط سرمایش مکانیکی، کار را تا رسیدن به دمای مطلوب ادامه داد.

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

تعیین محدودیتها

پس از شناسایی دماهای قابل تطبیق، لازم است که سایر عوامل مؤثر بر سردسازی طبیعی مورد بررسی قرار گیرند. مهم‌ترین این عوامل عبارتند از:

بار گرمایی و ظرفیت

جریانی که به منظور سردسازی طبیعی به کار می‌رود باید ظرفیت کافی و قابل توجهی برای خنک‌سازی جریان محصولات داشته باشد. به عنوان مثال اگر لازم باشد مقدار 10 kg/sec آب از 60°C تا 20°C خنک شود و در همان حال جریان آب دیگری در دمای 10°C نیازمند گرمایش باشد، بدیهی است فرصت خوبی جهت سردسازی طبیعی وجود دارد. البته این تنها زمانی ممکن است که مقدار آب سردی که باید گرم شود به اندازه کافی زیاد باشد. در صورتی که فقط مقدار 1 kg/sec آب سرد موجود باشد آنگاه آب گرم را فقط می‌توان از 60°C تا حدود 55°C خنک نمود، (با استفاده از معادله (۱) به ازای مقدار مناسب ظرفیت گرمایی ویژه آب). در صورت امکان بهتر است دماهای قابل تطبیق دیگر را نیز مورد بررسی قرار داد، مگر آنکه جریان قابل استفاده دیگری در دسترس نباشد. در چنین حالتی بهتر است که یک مرحله سردسازی به کمک محیط به دنبال این فرآیند صورت گیرد. نیاز به سرمایه‌گذاری مکانیکی فقط در روزهای گرم تابستان احساس می‌شود.

تطابق زمانی

بهترین حالت آن است که بارهای سرمایشی و گرمایشی محصولات همزمان باشند. در غیر این صورت واسطی جهت ذخیره گرما / سرما (مانند مخزن آب گرم یا سرد) مورد نیاز خواهد بود، که این خود سبب افزایش هزینه می‌شود.

محل و موقعیت

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

بارهای گرمایی و سرمائی باید به اندازه کافی نزدیک به یکدیگر باشند تا هزینه اتصال و لوله‌کشی تا حدودی کاهش یابد. این عامل زمانی که سرمایه‌ش توسط گاز صورت گیرد یکی از شرط‌های اساسی است، چرا که کانال‌کشی مورد نیاز در این حالت بسیار گران تمام می‌شود.

تماس

جهت رعایت موارد ایمنی یا به دلایل دیگر، عدم تماس دوجریان با یکدیگر از اهمیت خاصی برخوردار است. با انتخاب دقیق مبدل حرارتی مناسب یا با استفاده از حلقه‌های میانی حامل سیال، باید از برقراری میان دو جریان جلوگیری نمود.

۵-۲- شیوه‌های سردسازی طبیعی محیطی

چهار شیوه اصلی سردسازی محیطی وجود دارد که عبارتند از:

استفاده مستقیم از هوای سرد؛

- سیستم‌های سرد کننده تبخیری (مانند برج خنک کن آبی)؛
- سیستم‌های سرد کننده خشک (سردکنهای دودکشی با کویل‌های پره‌دار^۷)؛
- استفاده از یک منبع آبی طبیعی مانند آب رودخانه، آب دریا، آب چاه‌ای زیرزمینی و غیره.

تمامی این روش‌ها از این مزیت برخوردارند که از نظر کمی به طور گسترده‌ای در دسترس می‌باشند. در نتیجه ظرفیت سردسازی بالقوه، تقریباً نامحدود است. در سه روش اول، معمولاً بین جریان محصول و منبع سرما فاصله بسیار کوتاهی وجود دارد در حالیکه بکارگیری سیستم‌های لوله‌کشی و تصفیه جهت استفاده از منابع ذخیره طبیعی آب ممکن است گران و پرهزینه باشد.

⁷ - Finned coil blast cooler

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

استفاده مستقیم از جریان هوای سرد جهت سردسازی اتاق‌ها وقتی امکان‌پذیر است که دمای مورد نیاز اتاق بین مثلاً 5°C تا 20°C باشد. زمانی که دمای محیط به مقداری پایین‌تر از دمای کاری اتاق افت می‌کند، هوای سرد بیرون را می‌توان از طریق چندین مجرا به داخل هدایت نمود تا هرگونه بارگرمایی را جبران کند. بیشترین کاربرد این روش زمانی است که دمای مورد نیاز اتاق در حدود بالای محدوده یاد شده باشد، مانند تهویه مطبوع، سرمایش اتاق‌ای استقرار رایانه و سردسازی سردخانه‌های بالای صفر. از سردسازی مستقیم با جریان هوا جهت سرمایش محصولات جامد نیز می‌توان استفاده کرد (مانند نگهداری و انجماد محصولات گوشتی، مرغ و ماهی و انجماد شکلات). در مرحله طراحی برای استفاده از این شیوه باید دقت شود تا هوای سرد مورد استفاده کاملاً بهداشتی بوده و محصولات به سبب رطوبت اندک هوای سرد، خشک نشوند.

سردکننده‌های تبخیری یکی از منابع متداول سرمایش طبیعی هستند که همواره در صنایع مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. آب به عنوان سیال خنک‌کننده در یک برج خنک‌کن تبخیری سرد می‌شود و به دمایی در حدود 5°C بیش از دمای مرطوب هوای (wet bulb) محیط می‌رسد. رابطه میان دمای مرطوب و خشک هوا (dry bulb) در یک روز گرم و خشک تابستانی بسیار مهم است، چرا که به عنوان مثال، در چنین روزهایی که دمای خشک هوا ممکن است 25°C باشد، دمای مرطوب هوا تنها 15°C است. با استفاده از آب خنک حاصله می‌توان جریان محصولات داغ را در تمامی طول سال، پیش سرد کرد و در زمستان می‌توان از آن به جای آب سرد تولید شده توسط دستگاه‌های تبرید مکانیکی، جهت امور مختلفی که به دمایی در حدود 5°C تا 10°C نیاز دارند، استفاده نمود. در برخی موارد استفاده از سردکننده‌های تبخیری ممکن نیست (به عنوان مثال زمانی که امکان آلودگی آب وجود دارد و یا آنکه در جریان خنک‌کاری اصولاً آب نیست). در چنین مواردی می‌توان از کویل‌های سردکننده خشک استفاده نمود، به این ترتیب که

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

سیال گرم از درون یک کویل سرد پره‌داری می‌گذرد که از اطراف آن جریان اجباری هوای محیط عبور می‌کند.

دمای آب رودخانه‌ها یا دیگر منابع آب سطحی (دریاچه‌ها، دریاها و غیره) معمولاً تابع تغییرات دمای مرطوب هوای فصلی محیط است. بنابراین دمای آب در زمستان ممکن است 5°C یا کمتر و در تابستان حدود 15°C تا 20°C باشد. دمای آب چاه زیرزمینی معمولاً در تمامی طول سال تقریباً ثابت و در حدود 10°C می‌باشد، که این دما بستگی به عمق آنها دارد. اگرچه استفاده از این ذخایر، در مقایسه با سایر منابع محیطی پیش گفته، از لحاظ تأمین و تهیه آب مورد نیاز پرهزینه‌تر است، ولی به هنگام نیاز به مقادیر زیاد آب خنک، باید آنها را مد نظر قرار داد. گل و لای و رسوباتی که از رودخانه‌ها به درون تأسیسات و لوله‌کشی‌ها وارد می‌شود اغلب سبب گرفتگی شدید مجاری می‌شود (و گاهی اوقات سبب ایجاد خوردگی می‌گردد). در سرماهای شدید زمستانی آب این ذخایر ممکن است دچار یخ‌زدگی شود و همچنین هزینه‌های استخراج و پمپاژ در این روش ممکن است قابل توجه باشد.

۵-۳- سردسازی طبیعی محصولی با محصول دیگر

شیوه‌های سردسازی طبیعی محصولی با محصول، بسیار بیشتر از روش‌های محیطی، به نوع و ساختار فرآیند وابسته است و اغلب در مواردی که خنک‌سازی مایعات مدنظر است به کار می‌رود. این کار را می‌توان یا با سردسازی مستقیم یک محصول مایع (مانند شیر، ماء‌الشعیر و غیره) و یا با سرمایش غیر مستقیم با استفاده از یک مایع مبرد ثانویه مانند گلیکول یا آب سرد، انجام داد. به طور کلی سردسازی طبیعی محصولات مزیتی دوگانه دارد، زیرا از یک سو عمل سردسازی یک محصول از سوی دیگر فرآیند حرارت‌دهی محصولی دیگر انجام می‌پذیرد (مثال ۵ را مشاهده کنید).

جریان‌های سردی از فرآیند که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند به سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

- آب ورودی مورد استفاده در فرآیند؛
- جریان یک محصول سرد که نیاز به گرمایش دارد (مانند شیر سردی که باید پاستوریزه شود).
- جریان‌های خاص مواد مورد نیاز برای امور خدماتی (مثل CO_2 ، N_2 ، O_2) که نیاز به تبخیر دارند.

آب سرد ورودی را می‌توان گاهی به جای آب سرد شده توسط دستگاه‌های تبرید و یا آب برج خنک‌کن مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، بار گرمایش محصولات سرد در صنایع شیمیایی امری متداول است و در صنایع غذایی کاربرد اصلی آن در پاستوریزه نمودن محصولات است. در اغلب موارد پاستوریزه کردن به طریق بازیابی مجدد انرژی^۸ صورت می‌گیرد (که در حقیقت نوعی خنک‌سازی طبیعی است)، اما استفاده از شیوه خنک‌سازی طبیعی ممکن است همواره بهینه نباشد. عمل تبخیر گازهای خاص مورد مصرف در صنایع، تحت دمای پایین روی می‌دهد و این امر اغلب نیازمند تبخیر کننده‌هایی است که با بخار گرم می‌شوند. از

⁸ - Regenerative

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

طرفی، آب یا گلیکول سرد گرمای کافی برای تبخیر اینگونه مایعات را دارند، که این خود می‌تواند به عنوان یک منبع سرد در سیستم به کار رود. البته این روش تنها وقتی به صرفه خواهد بود که مقدار گازی که باید تهیه شود به قدر کافی باشد.

مثال ۵- سردسازی طبیعی با استفاده از آب فرآیند ورودی

در یک طرح تهیه قهوه، از آب سرد ورودی به عنوان ماده خام اولیه استفاده می‌شد. این آب تحت فشار از دمای 10°C تا دمای 180°C گرم شده و سپس تحت یک فرآیند قهوه‌زنی^۹ قرار می‌گرفت. سپس مایع قهوه حاصل از دمای 80°C تا دمای 15°C طی دو مرحله خنک می‌شد که مرحله اول با استفاده از آب برج خنک‌کن تبخیری و مرحله دوم با استفاده از آب سرد شده توسط یک آب سردکن جهت خنک کردن محصول از دمای 30°C تا 20°C صورت می‌گرفت. نرخ جریان مایع قهوه خروجی بسیار نزدیک به نرخ جریان آب تغذیه ورودی بود و جریان‌ها از نزدیک یکدیگر عبور می‌کردند. در طرح اصلاحی به جای سیستم خنک‌ساز قبلی، از یک صفحه مبدل حرارتی که به صورت همزمان آب ورودی را تا 70°C گرم و مایع قهوه خروجی را تا 20°C سرد می‌نمود، استفاده به عمل آمد. این امر سبب کاهش هزینه‌های گرمایش و سردسازی شد و طی ۸ ماه به مرحله سوددهی رسیده و فرآیند کنترل سیستم را نیز بهبود بخشید.

۶- خلاصه بخش دوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

- ابتدا باید طراحی فرآیند را مد نظر قرار داد زیرا همواره بهتر است که به جای استفاده از یک سیستم تبرید مکانیکی، کوشش به عمل آید تا بار سرمایی بطور قابل ملاحظه‌ای حذف و یا کاهش یابد.
- بارهای حرارتی وارد بر سیستم تبرید مکانیکی را باید کاهش داد.
- سردسازی طبیعی را در نظر بگیرید. در برخی موارد می‌توان بار سرمایی را تا حدودی حذف نمود و سپس جهت رسیدن به درجه حرارت مطلوب‌تر از تبرید

^۹ - Coffee percolating process

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی فرآیند

مکانیکی استفاده نمود. اغلب تحت شرایط آب و هوایی خنک می‌توان بارهای سرمایی را به صورت جزئی یا کامل حذف کرد، ولی در شرایط آب و هوای گرم‌تر این امر نیازمند تبرید مکانیکی است.

- شیوه‌های سردسازی طبیعی محصولی با محصول خیلی بیشتر از روش‌های محیطی، به نوع و ساختار فرآیند وابسته هستند. به طور کلی سردسازی طبیعی محصولات مزیتی دوگانه دارد زیرا از یک سو عمل سردسازی یک محصول و از سوی دیگر فرآیند حرارت‌دهی محصولی دیگر انجام می‌پذیرد.

بخش سوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

این بخش از کتاب به بحث در زمینه فرصت‌های محتمل جهت افزایش

بازدهی سیستم در مرحله طراحی می‌پردازد و شامل موارد زیر است:

- انتخاب‌های ممکن برای ساختار و سیکل (چرخه کاری) تبرید.
- سیاست‌های کنترلی؛
- فرصت‌های بازیابی حرارت؛
- ذخیره حرارتی

همواره لازم است که ارزیابی فرصت‌های ممکن جهت بهبود کارایی فرآیند در مرحله طراحی مد نظر قرار گیرد. سپس نوبت به بررسی کلی سیستم تبرید مناسب برای فرآیند خاص می‌رسد و در نهایت موضوعات مربوط به عملکرد تک‌تک اجزاء مطرح می‌گردد.

۷- انتخاب نوع پیکربندی و چرخه کاری

انتخاب نوع پیکربندی و چرخه کاری به بحث درباره انتخاب مبردها، استفاده یا جلوگیری از به کار بردن مبردهای ثانویه، نوع چرخه کاری مورد استفاده (مانند استفاده از چرخه تک مرحله‌ای یا دو مرحله‌ای، سیستم یکپارچه یا سیستم چند بخشی) و مواردی از این قبیل مربوط است. ترکیبات بسیار متنوع و پیچیده‌ای برای انتخاب پیکربندی و چرخه کاری مناسب وجود دارد. بنابراین برای دستیابی به بهترین انتخاب‌ها باید امکانات مختلف را مورد ارزیابی دقیق قرار داد. در اینجا برخی از نکاتی که

از اهمیت بیشتری برخوردارند ارائه شده‌اند، ولی در عمل مباحث مربوط به بهره‌وری انرژی را باید در کنار سایر موارد مهندسی از قبیل ایمنی، قابلیت اطمینان و غیره، مورد بررسی قرار داد.

۷-۱- انتخاب مبرد

انتخاب مبرد به نحو قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد و هزینه کلی طرح تأثیر می‌گذارد. عوامل مهم در این زمینه شامل جنبه‌های ترمودینامیکی مبردها، ملاحظات عملی و به طور روزافزونی مباحث مربوط به محیط زیست می‌باشند.

در مورد مبردها باید عوامل ترمودینامیکی زیر را مورد بررسی قرار داد:

- ضریب عملکرد مبرد مورد نظر در مقایسه با ضریب عملکرد سایر مبردهای قابل استفاده چگونه است؟

- چه کمپرسوری و با چه حجمی (از نظر اندازه و قیمت) جهت انجام سرمایش لازم است؟

- آیا حداکثر فشار کندانسور در حدی واقع بینانه قرار دارد تا نیازی به مخازن تحت فشار و گران قیمت نباشد؟ همچنین بهتر است از ایجاد فشارهای منفی در اواپراتور جلوگیری شود تا خطر نفوذ هوا از اتصالات لوله‌ها، کاسه نمد محورها و محل‌های دیگر کاهش یابد.

- از افزایش دمای گاز خروجی از کمپرسور نیز باید اجتناب شود تا از خطر تجزیه حرارتی مبرد، جلوگیری به عمل آید.

- ویژگی‌های انتقال حرارتی سیال عامل بر هزینه و ابعاد مبدل حرارتی تأثیر قابل توجهی دارد.

با مد نظر قرار دادن موارد عملی زیر، باید عوامل بالا را به دقت ارزیابی نمود:

- درجهٔ سمی بودن.

- قابلیت اشتعال. اغلب مبردهای نوع فریونی (CFCها) غیر قابل اشتعال هستند. سایر سیال‌های مورد استفاده (همانند آمونیاک، پروپان و غیره) در مجاورت اندکی هوا به شدت قابل انفجارند.
- قیمت مبرد. تأمین سیال عامل طرح‌های عظیم تبرید، یک کار اساسی است. نه تنها هزینه شارژ اولیه سیستم را باید مد نظر قرار داد، همچنین باید هزینه‌های عملیاتی را نیز در نظر گرفت تا بتوان هزینه کلی مبرد مورد نیاز را تعیین نمود.
- قیمت سیستم. باید از ایجاد فشارهای خیلی بالا یا خیلی پایین در سیستم جلوگیری نمود، چرا که این امر سبب صرف مخارج سنگین و قابل ملاحظه‌ای برای تهیه مخازنی که در برابر فشارهای بالا یا پایین مقاوم هستند، خواهد شد. (از قبیل مخازن تحت فشار، مبدل‌های حرارتی، لوله‌ها و غیره). برای شارژ ثانویه مبرد نیز هزینه بسیاری صرف می‌شود.
- جنس اجزاء سیستم. در انتخاب جنس لوله‌ها، مخازن و امثال آن باید توجه خاصی مبذول داشت تا برای نوع مبرد انتخابی مناسب باشد. یکی از جنبه‌هایی که در انتخاب مبرد از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده است مربوط به خطرات زیست محیطی می‌شود. استفاده از مبردهای (CFCها) که اثرات مخربی بر لایه ازن دارند بر اساس توافقنامه مونترال محدود شده و نباید از آنها در طرح‌های جدید تبرید استفاده نمود.
- تبدیل تأسیسات موجود تبرید به طرح‌هایی که در آنها از مبردهای مجاز استفاده می‌شود باید به طور جدی در دستور کار قرار گیرد. در حال حاضر مبردهای جایگزین جدید (از قبیل R134a, R123, R69-s) در دست تهیه و توسعه هستند. از آنجا که این جنبه طراحی سیستم‌های تبرید در حال تحول و تغییر سریعی است، پیشنهاد می‌شود که در مورد ویژگی‌های هر مبرد از نظر میزان فراوانی در بازار، قیمت و خواص ترمودینامیکی و

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

ترموفیزیکی، آخرین توصیه‌های افراد متخصص مد نظر قرار گیرد.

۷-۲- مبردهای ثانویه

در بسیاری از سیستم‌های تبرید، سیال مبرد مستقیماً محصول یا فضایی را که باید خنک شود، سرد می‌کند. چون در این شیوه از هیچ‌گونه سیال واسطی استفاده نمی‌شود و اختلاف دمای اواپراتور با محیط سرد را می‌توان به حداقل رساند، کارایی سیستم بسیار خوب است. البته در صورتی که استفاده مستقیم از سیال مبرد با دشواری همراه باشد و یا آنکه از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد بهتر است که از یک مبرد ثانویه استفاده شود. (به عنوان مثال زمانی که فضا یا محصول سردشونده در فاصله‌ای قابل ملاحظه از کمپرسور یا کندانسور قرار دارد).

مبردهای ثانویه متداول، شامل آب، پروپیلن گلیکول، محلول نمک کلرید کلسیم،^{۱۰} الکل‌ها و کربنات پتاسیم هستند. زمانی که دمای مورد نیاز برای مبرد ثانویه بالاتر از $^{\circ}\text{C}$ است تقریباً همیشه از آب استفاده می‌شود، این امر به دلیل لزجت کم^{۱۱}، گرمای ویژه بالا و ویژگی‌های خوب انتقال حرارت آب است. همچنین آب بسیار ارزان است و تقریباً خاصیت خوردندگی ندارد. زمانی که استفاده از مبردهای ثانویه در دمای پایین‌تر از $^{\circ}\text{C}$ مد نظر باشد، بررسی ویژگی‌هایی نظیر توان مورد نیاز برای پمپ کردن سیال از اهمیت خاصی برخوردار است. این امر به لزجت سیال، گرمای ویژه، چگالی و شدت جریان جرمی آن بستگی دارد.

از آنجائیکه انتخاب نوع مبرد ثانویه بر ابعاد مورد نیاز مبدل‌های حرارتی و نیز هزینه عملیاتی آنها اثر می‌گذارد، بررسی خواص مربوط به انتقال حرارت سیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از دیگر موضوعات مربوطه، میزان خوردندگی و قیمت مبرد ثانویه است. استفاده از یک مبرد ثانویه نیازمند بذل توجه بسیار دقیق‌تر است چرا که هزینه‌های اولیه اجرایی در مقایسه با

^{۱۰} - Calcium chloride brine

^{۱۱} - Viscosity

سیستم‌های تبرید مستقیم بیشتر است. همچنین در صورت استفاده از یک مبرد ثانویه، باید جوانب و مقاصد اقتصادی از نظر حرارت ذخیره شده در سیستم را نیز مدنظر قرار داد.

۷-۳- تبرید دو مرحله‌ای

جهت افزایش کارایی سیستم‌هایی که در آنها اختلاف دمای کندانسور و اواپراتور زیاد است از تبرید دو (یا چند) مرحله‌ای استفاده می‌شود. فواید اولیه این امر عبارتند از افزایش ضریب عملکرد، کاهش هزینه‌های راهبری و جلوگیری از افزایش دمای خروجی کمپرسور.

برای کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های چند مرحله‌ای، همانند سیستم‌های تراکمی تک مرحله‌ای، باید مسائل طراحی مشابهی را در نظر گرفت (مثلاً حداقل افزایش دما، انتخاب درست کمپرسور، حفظ کارآئی آن و سایر موارد مربوطه) برای توجیه استفاده از یک طرح دو (یا چند) مرحله‌ای به جای یک سیستم تک مرحله‌ای باید تحلیلی دقیق از نسبت هزینه‌های اضافی به منافع حاصله، به عمل آید.

به عنوان یک توصیه و راهنمایی، بهتر است که امکان استفاده از سیستم‌های چند مرحله‌ای در مورد تأسیسات بزرگ صنعتی که دمای تبخیر در آنها پایین‌تر از 15°C و یا اختلاف دمای بین تبخیر و تقطیر بیش از 4°C است و یا هنگامی که ساعات کارکرد طرح نسبتاً زیاد است، مورد بررسی جدی قرار گیرد.

۷-۴- اواپراتورهای انبساط مستقیم^{۱۲} و اواپراتورهای غوطه‌ور^{۱۳}

¹² - Direct Expansion

یکی از موارد بسیار مهم و قابل بحث در طراحی سیستم‌های تبرید، انتخاب نوع اواپراتور است. انواع اواپراتورها به طور کلی در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند؛ اواپراتورهای انبساط مستقیم (dx) و اواپراتورهای غوطه‌ور، اواپراتورهای نوع (dx) عموماً با استفاده از بخشی از سطح انتقال حرارت در اواپراتور موجب فوق‌گرمایش بخار مبرد، پیش از ورود به لوله مکش می‌شوند. بسته به نوع وسیله کنترل‌کننده مورد استفاده تا حدود ۳۰٪ سطح داخلی اواپراتور می‌تواند خشک باشد. این امر خاطر نشان می‌سازد که تحت هیچ یک از شرایط کاری محتمل مایع مبرد وارد لوله مکش کمپرسور نمی‌شود.

جهت استفاده کامل‌تر از سطح انتقال حرارت موجود، در سیستم‌های بزرگتر، از اواپراتورهای غوطه‌ور استفاده می‌گردد. دو نوع اواپراتور غوطه‌ور موجود است. اواپراتورهای با چرخه گرانشی که توزیع مبرد در آنها به صورت طبیعی و تحت تأثیر جاذبه صورت می‌گیرد و اواپراتورهایی که توزیع مبرد در آنها به صورت اجباری و توسط پمپ صورت می‌گیرد (اواپراتورهای با تغذیه مایع زیاد). اواپراتور غوطه‌ور با چرخه گرانش معمولاً در سیستم‌های بزرگی که تنها یک اواپراتور دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. اواپراتورهای با تغذیه مایع بیش از حد، زمانی که چندین اواپراتور غوطه‌ور در سیستم وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع اواپراتور با استفاده از یک پمپ، مایع مبرد با سرعت زیادی به حرکت درمی‌آید و در نتیجه ضریب انتقال حرارت داخلی زیاد می‌شود. اواپراتورهای نوع dx عموماً از لحاظ حرارت در واحد سطح، نسبت به انواع غوطه‌ور، از بازدهی کمتری برخوردارند. البته سادگی آنها، هزینه اولیه پایین‌تر و طرح جمع و

جورشان در کنار حجم کمتر مبرد مورد نیاز و مشکلات کمتری که در برگشت روغن از خودن نشان می‌دهند، سبب تعمیم استفاده از آن‌ها در سیستم‌های کوچک و متوسط شده است. البته انتخاب نهایی اواپراتور تنها پس از ارزیابی دقیق همه موارد پیش گفته باید صورت گیرد.

۷-۵- طرح یکپارچه^{۱۴} در مقابل طرح چندبخشی^{۱۵}

یکی دیگر از انتخاب‌های مطلوب و مناسب به هنگام طراحی سیستم به بررسی مزایای نسبی استفاده از یک سیستم یکپارچه بزرگ مرکزی در مقایسه با تعدادی سیستم‌های مجزای کوچک‌تر مربوط می‌شود. سیستم‌های مجزا دارای مزیت یک واحد محدود و ساده هستند که می‌توانند بسیار نزدیک به نقطه کار مطلوب عمل کنند و به بازدهی خوبی دست یابند. در محل‌هایی که دمای بارهای سرمایی متنوع است، می‌توان هر یک از این واحدهای مجزا را جهت تأمین ضریب عملکرد بهینه برای هر یک از بارهای سرمایی انتخاب نمود. البته لازم به ذکر است که در صورت استفاده نامناسب از سیستم‌های کنترل و یا اجزای غیر کاراً (از قبیل شیرهای انبساط ترموستاتیک) ممکن است بازدهی کلی سیستم کم باشد. همچنین ممکن است تعمیر و نگهداری یک سیستم چند بخشی دشوارتر از یک طرح یکپارچه باشد، که این امر احتمال دستیابی به ضریب عملکرد بهینه را کمتر خواهد کرد.

در صورتی که سیستم‌های یکپارچه بزرگ به درستی طراحی شوند، می‌توانند از مزایای اقتصادی که سیستم‌های بزرگ به طور طبیعی از آن بهره‌مند هستند، برخوردار شوند. یک طرح یکپارچه تحت بار جزئی قادر است استفاده مؤثرتری از سطوح انتقال حرارت موجود بنماید. اما مشکل اصلی اینگونه سیستم‌ها در پیچیدگی و مسائل کنترلی آنها است. عملکرد

¹⁴ - Integrated

¹⁵ - Modular

ضعیف و ناتوانی این سیستم‌ها تحت بار جزئی وقتی که محدوده گسترده‌ای از بارهای سرمایی در سطوح مختلف دمایی وجود داشته باشد، منجر به هزینه‌های عملکرد بالایی می‌شود، مگر آنکه طراحی با دقت کامل انجام پذیرفته باشد. این مشکل عموماً از آنجا ناشی می‌شود که سیستم غالباً برای کارکرد با پایین‌ترین دمای تبخیر مورد نیاز طراحی می‌گردد، در حالی که ممکن است بخش عظیمی از بارها تحت دماهایی باشند که به نحو قابل ملاحظه‌ای از این حد بالاترند.

یکی از انتخاب‌هایی که می‌تواند از لحاظ هزینه بسیار مقرون به صرفه باشد، استفاده از یک یا چند واحد کوچک جهت سرمایش بارهای معین (مانند استفاده از یک واحد آب‌سردکن مجزا) در کنار یک سیستم یکپارچه است که به منظور سرمایش بارهای اصلی و تحت دماهای مشابه به کار می‌رود. هر بخشی از تأسیسات باید با دقت با توجه به ویژگیها و قابلیت‌های آن تعیین و نصب شود تا بتوان بهترین ترکیب از طرح‌های یکپارچه و چند بخشی را بدست آورد.

۷-۶- اوپراتورهای موازی و متوالی

در سیستم‌های یکپارچه موجود و یا جدید از تعدادی اوپراتور (خنک‌کننده) که به صورت موازی با یکدیگر نصب شده‌اند، استفاده می‌شود. در صورتی که لازم باشد تبرید تحت دو دمای تبخیر متفاوت صورت گیرد (مثلاً در یک سیستم چند مرحله‌ای) باید توجه را به اتصال متوالی خنک‌کننده‌ها معطوف نمود. این امر از آن رو که بخشی از سردسازی تحت دمای بالاتری صورت می‌گیرد سبب تأمین ضریب عملکرد بالاتری می‌شود. البته از آن جا که اختلاف دمای موثر متوسط در هر اوپراتور کاهش می‌یابد، ممکن است لازم باشد که از مبدل‌های حرارتی بزرگتری استفاده شود. همچنین توان پمپاژ مورد نیاز در حالت اتصال متوالی ممکن است اندکی

بیشتر باشد.

۸- تدابیر کنترلی

تدابیر کنترلی یک سیستم تبرید می‌تواند مهمترین عامل برای جلوگیری از افزایش هزینه‌های عملیاتی سیستم باشد. این مسأله به ویژه در مورد سیستم‌های ساخته شده موجود، صحت دارد و باید توجه بسیاری را بر این موضوع معطوف داشت. یک سیستم کنترل مناسب باید دست‌یابی به حداکثر میزان بازدهی را در شرایط مختلف تضمین نماید. دلایل کلیدی استفاده از سیستم‌های کنترل، عبارتند از:

- جلوگیری از کارکرد بیش از حد کمپرسورها تحت بار جزئی و به ویژه اجتناب از اعمال کنترل به وسیله کنار گذر گاز داغ^{۱۶}، ایجاد خفغان در مسیر مکش گاز^{۱۷}، استفاده از شیرهای کشویی^{۱۸} و پرّه‌های هادی ورودی^{۱۹}.
- اجتناب از کنترل فشار تخلیه کمپرسور و اجتناب از ایجاد دماهای تقطیر بیش از حد.
- اجتناب از ایجاد دماهای پایین غیر ضروری در اواپراتور.
- اجتناب از قطع و وصل‌های مکرر در مکانیزم‌های برداشت بار از روی کمپرسور.
- تضمین قابلیت کنترل موثر تجهیزات کمکی و جانبی تحت بارهای پایین.
- تضمین کنترل موثر بارهای سرمایی؛ به مثال ۶ رجوع کنید.

¹⁶ - Hot gas bypass

¹⁷ - Suction gas throttling

¹⁸ - Slide Valves

¹⁹ - Inlet guide Vanes

مثال ۶- بهسازی کنترلی بر روی سردسازی طبیعی

در یک کارخانه سازندهٔ ماءالشعیر، مالت مخصوص تخمیر به وسیلهٔ آب سرد ورودی خنک می‌گردد. پس از آن مالت را توسط گلیکول تحت تبرید تا رسیدن به دمای مطلوب خنک می‌کنند. در زمستان آب ورودی به اندازه کافی سرد بوده و نیازی به سرمایش مجدد آن نمی‌باشد. با این وجود معمولاً مشاهده می‌شود که کنترل مناسبی بر روی سرد کننده ثانویه وجود ندارد. به این صورت که گاهی برای راحتی کار راهبری سیستم سرد کننده ثانویه تحت بار کامل رها می‌شود و دمای محصولات را از طریق کاهش نرخ جریان آب کنترل می‌کنند. در یک مورد خاص، این کنترل ضعیف سبب اتلاف انرژی به ارزش ۲۵۰۰۰ پوند در سال گردیده است در حالی که هیچ هزینه اضافی جهت تصحیح و بهبود این وضعیت لازم نبوده و تنها با تغییر عاداتهای غیردرست در اداره سیستم، امکان رفع این نقصیه وجود داشته است.

۸-۱- عملکرد کمپرسورها تحت بار جزئی

کارکرد کمپرسورها تحت بار جزئی تأثیر بسیار بدی بر ضریب عملکرد سیستم دارد. شکل (۶)، کاهش سریع ضریب عملکرد سیستم تحت بار جزئی را برای انواع کمپرسورها نمایش می‌دهد. این کاهش کارایی به سبب مصرف بخش بزرگ و فزاینده‌ای از توان توسط تجهیزات جانبی مورد نیاز (مانند پره‌های ورودی، شیرهای کشویی و سایر موارد) به وجود می‌آید.

۸-۲- کنترل ترتیب کار کمپرسورها

تعداد سیستم‌های تبرید بزرگی که در آن کمپرسورها همگی تحت بار جزئی، و سایر اجزاء و تجهیزات کمکی مربوطه (همانند دمنده‌ها، پمپ‌ها و غیره) تحت بار کامل کار می‌کنند، کم نیستند. در چنین شرایطی، با کسب اطمینان از وجود یک سیستم کنترل ترتیب کمپرسورها، می‌توان به صرفه‌جویی‌های اساسی دست یافت. تحت شرایط بار پایین بهتر است نوبت‌بندی کار کمپرسورها چنان تنظیم گردد که در هر زمان بیش از یکی از آنها تحت بار جزئی کار نکند و سایر کمپرسورها یا تحت بار کامل باشند و یا توسط تجهیزات کمکی دیگر به طور خودکار از دور خارج شوند.

در انتخاب کمپرسور مناسب باری کار تحت بار جزئی باید دقت شود. کمپرسورهای پیستونی اغلب تحت بار جزئی، نسبت به کمپرسورهای گریز از مرکز یا پیچی، کارایی بهتری از خود نشان می‌دهند و بهتر است که حتی‌المقدور در سیستم‌هایی که از چند بخش جداگانه تشکیل شده‌اند از این

نوع کمپرسور استفاده شود. کمپرسورهای گریز از مرکز و پیچی بهترین انتخاب برای تأمین بارهای پایه‌ای تبرید هستند و ترجیحاً باید در سیستم‌هایی که دارای دمای تقطیر و تبخیر تقریباً ثابت هستند به کار روند. از کاربرد کمپرسورهای گریز از مرکز و پیچی، تحت بار جزئی باید اجتناب کرد.

استفاده از کنترل کننده‌ای را باید مورد توجه قرار داد که در هر حال مناسب‌ترین کمپرسورها را به کار گیرد. (یعنی آنهایی را که دارای بالاترین بازدهی آنتروپی ثابت در آن شرایط هستند). همچنین سیستم کنترل باید بتواند در هر زمان مناسبترین ترکیب از کمپرسورها، کندانسورها، اوپراتورها، شیرها و غیره را با بیشترین ضریب عملکرد در مدار قرار دهد. به هنگام استفاده از طرح‌های دو مرحله‌ای باید بتوان مناسبترین فشار میان مرحله‌ای را تنظیم کرد تا به واسطه آن حداکثر بازدهی و حداقل هزینه‌های اجرایی حاصل گردد.

۸-۳- کنترل ظرفیت کمپرسور

سیستم‌های مختلفی برای کنترل ظرفیت کمپرسورها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تقریباً تمامی شیوه‌های کنترل ظرفیت، کم و بیش سبب کاهش ضریب عملکرد کلی سیستم می‌شوند. شیوه‌های کنترل عبارتند از:

- روشن و خاموش کردن کمپرسورها^{۲۰}؛

²⁰ - On/ Off operation

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

- باربرداری از سیلندرها (در مورد کمپرسورهای پیستونی)؛
- استفاده از موتورهای دور متغیر؛
- شیرهای کشویی (در کمپرسورهای پیچی)؛
- پره‌های هادی ورودی (در مورد کمپرسورهای گریز از مرکز)؛
- ایجاد خفکان در مسیر مکش
- ایجاد مسیر کنار گذر برای گاز داغ.

روشن و خاموش کردن کمپرسورها راهی ساده و مطمئن برای تضمین عمل تبرید در زمان‌های مورد نیاز است. البته خاموش و روشن کردن‌های مداوم و متوالی کمپرسورها می‌تواند سبب بروز مشکلاتی در تعمیر و نگهداری آنها شود.

باربرداری از سیلندرها

استفاده مداوم از این شیوه جهت کنترل ظرفیت کمپرسورهای پیستونی چند سیلندر مرسوم است. با کاهش ظرفیت سرمائی مورد نیاز، توان مصرفی نیز کاهش می‌یابد. البته نسبت کاهش به صورت یکسان نیست زیرا تلفات اصطکاکی و سایر تلفات مزاحم در یک سیلندر بی‌بار، همچنان باقی می‌ماند.

استفاده از موتورهای دور متغیر

با استفاده از این شیوه می‌توان کنترل ظرفیت را به نحو مؤثری انجام داد. در صورت استفاده از کمپرسورهای پیستونی، پره‌ای و پیچی، می‌توان از این شیوه استفاده نمود، ولی همواره باید دقت داشت که این روش سبب کاهش بازدهی کمپرسور می‌شود. سایر نکات عملی همچون کارآیی پمپ

روغن تحت سرعت‌های دورانی پایین را نیز نباید فراموش نمود. به طریقی مشابه، نحوه عملکرد کمپرسورهای گریز از مرکز تحت بار جزئی در شرایط غیر از سرعت نامی نیازمند تحلیلی دقیق است. در مورد کلیه کمپرسورها یکی از مسایل بسیار با اهمیت به هنگام کار با سرعت متغیر، لزوم اجتناب از سرعت‌هایی است که موجب ایجاد بسامدهای بحرانی و مشکلات ارتعاشی می‌گردد.

از آنجا که هیچ رابطه خطی میان سرعت (PRM)، ظرفیت راندمان و ضریب عملکرد سیستم وجود ندارد، تنها با رجوع به اطلاعات منتشر شده از سوی سازندگان کمپرسورها، می‌توان به راه حل بهینه‌ای برای یافتن نقطه کاری مناسب دست یافت. استفاده از کمپرسورها تحت سرعت‌های متغیر تنها باید با کمک راهنمایی‌های سازندگان آن صورت گیرد.

شیرهای کشویی

شیرهای کشویی جهت کنترل ظرفیت کمپرسورهای پیچی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از شیرهای کشویی می‌توان به تنظیم یکنواخت و پردامنه‌ای تا حد کمتر از ۱۰٪ ظرفیت نامی دست یافت. البته رابطه میان ظرفیت سرمائی و توان مصرفی غیر خطی است و یک کمپرسور پیچی زمانی که تحت بار جزئی کار می‌کند، کسر بزرگی از توان بار کامل را مصرف می‌کند.

پره‌های هادی متغیر ورودی

از این پره‌ها می‌توان در کمپرسورهای گریز از مرکز به منظور کنترل ظرفیت استفاده نمود. این پره‌ها درون پوسته کمپرسور و مستقیماً در بخش پیشین مقطع ورودی پروانه دوار نصب می‌شوند. در این حالت، کاهش ظرفیت با تغییر مسیر جریان پیش از آنکه بخار میرد وارد پروانه دوار شود حاصل می‌گردد. این شیوه راهی

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

کاملاً غیر کارا جهت کنترل ظرفیت است چرا که موجب کاهش بازده آنتروپی ثابت کمپرسور و در نتیجه ضریب عملکرد سیستم می‌شود.

ایجاد خفقان در مسیر مکش

استفاده از این روش برای کنترل ظرفیت، سبب اتلاف زیاد انرژی می‌شود. پدیده خفقان در خطوط مکش با کاهش فشار ورودی کمپرسور، ظرفیت را کنترل می‌کند. این امر معادل آن است که سیستم تحت دماهایی پایین‌تر از دمای نامی طراحی کار کند و تمامی ویژگی‌های کاهنده بازدهی در این دو حالت یکسان است. هر گونه تأسیسات نصب شده‌ای را که از وسیله‌ای جهت ایجاد پدیده خفقان در خطوط مکش استفاده می‌کند باید به دقت مورد بررسی قرار داد تا شاید بتوان در آنها روش دیگری را برای کنترل ظرفیت پیدا کرد.

ایجاد مسیر کنارگذر برای گاز داغ

با استفاده از این شیوه بخشی از گاز داغ پر فشار از مقطع خروجی کمپرسور به سوی یک شیر انبساط و از آنجا به طرف قسمت کم فشار سیستم رانده می‌شود و در نتیجه ظرفیت سرمائی سیستم کاهش می‌یابد. این شیوه نیز یک روش غیر کارا جهت کنترل ظرفیت است، چرا که هیچ‌گونه سرمایه‌ش مفیدی توسط گاز خروجی انجام نمی‌گیرد و در نتیجه هیچ کاهشی در توان مصرفی کمپرسور بوجود نمی‌آید. همچنین به جز در مواردی که طراحی به طور کاملاً صحیحی صورت گرفته است، گاز داغ خروجی می‌تواند سبب فوق‌گرمایش بخار در مسیر مکش شده و موجبات گرم شدن بیش از حد کمپرسور را فراهم آورد.

بازگشت گاز داغ از طریق مجاری فرعی اغلب به عنوان تنها شیوه ممکن جهت کنترل ظرفیت کمپرسورهای کوچک (با توان تا ۱۰ کیلووات) به کار می‌رود. البته همواره می‌توان از این شیوه به عنوان یک راه حل تکمیلی برای دستیابی به امکان کنترل ظرفیت تا حدود بار "صفر درصد" به موازات

سایر روشهای موثرتر، استفاده کرد. جهت استفاده و بهره‌وری بیشتر از انرژی بهتر است که از روش بازگشت گاز داغ به طور کلی احتراز کرد. بهتر است تأسیسات موجودی که از این شیوه جهت کنترل ظرفیت استفاده می‌کنند، مورد تحلیل و بررسی قرار گیرند تا شاید بتوان روش بهتری را برای این منظور برگزید. البته نکته قابل توجه در این خصوص این است که از روش گاز داغ می‌توان به نحو مناسبی جهت راه‌اندازی کمپرسور در حالت بی‌باری استفاده کرد تا جریان راه‌اندازی و در نتیجه ابعاد موتور مورد نیاز کاهش یابد. در این حالت باید مجرای فرعی گاز داغ را بلافاصله پس از راه‌اندازی سیستم مسدود نمود.

۸-۴- کنترل فشار مکش

فشار مکش (یا دمای تبخیر) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر هزینه‌های کاری و اجرایی دارد. یک سیستم کنترل فشار باید بتواند فشار مکش را به طور یکنواخت و در حداکثر مقدار مجاز حفظ نماید. این امر بدین معناست که باید راه‌اندازی و باربرداری از کمپرسورها به نحوی صورت گیرد که بار سیستم تثبیت گردد.

۸-۵- کنترل فشار خروجی کمپرسورها

حفظ فشار خروجی کمپرسورها در کمترین سطح ممکن امری حیاتی است. این بدان معناست که باید کندانسورها را با توجه به میزان بار به خوبی کنترل نمود تا زمینه ایجاد فشار زیاد در خروجی حذف گردد.

۹- سایر ملاحظات

۹-۱- بازیابی حرارت

بازیابی حرارت از سیستم‌های تبرید، به خصوص در صنایعی که نیاز به منابع حرارتی با درجه حرارت نسبتاً کم دارند (به عنوان مثال آبگرم برای شستشو در صنایع غذایی)، می‌تواند از ملاحظات مهم باشد. زمانی که بازیابی حرارتی مد نظر است، بهتر است جنبه‌های زیر مورد بررسی و مطالعه قرار گیرند:

- آیا می‌توان بدون بالا بردن دمای تقطیر، حرارت را از کندانسور به نحو موثری بازیابی نمود؟
 - آیا می‌توان حرارت را از خنک کننده روغن بازیابی کرد؟
 - آیا می‌توان بازیابی حرارت تحت دماهای بالاتر را، با داغی زدایی گاز خروجی از کمپرسور، انجام داد؟
 - میزان فایده در مقایسه با ضررهای ناشی از افزایش دمای تقطیر جهت بازیابی حرارت تحت دماهای بالاتر چقدر است؟
 - آیا تناسب قابل قبولی بین میزان و زمان گرمادهی منبع حرارتی و تقاضای مصرف کننده وجود دارد؟
 - هزینه‌های اضافی (ناشی از مبدلهای حرارتی، کنترل کننده‌ها، تأسیسات لوله‌کشی، شیرها، سیستم‌های ذخیره گرما و غیره) و زمان لازم برای رسیدن به دوره سوددهی به چه صورت است؟
- برخی از این جنبه‌ها را لازم است که به صورت موردی و با دقت قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار داد تا از اقتصادی بودن طرح بازیابی حرارت اطمینان حاصل گردد. بخصوص در سیستم‌های بازیافتی که نیاز به افزایش دمای تقطیر دارند باید توجه داشت که کاهش حاصل در ضریب عملکرد و افزایش هزینه‌های اجرایی را اغلب نمی‌توان با صرفه‌جویی‌های حاصل از سوخته‌های فسیلی جبران نمود.
- در صورتی که بتوان یک چاه حرارتی مناسب جهت دفع حرارت بازیابی

شده مهیا کرد، با استفاده از یک مبدل حرارتی مجزا و داغی‌زدایی از گاز خروجی کمپرسور، می‌توان سیستمی مقرون به صرفه بدست آورد. در این صورت همچنین می‌توان اندازه و قیمت کندانسور مورد نیاز را کاهش داد، که این امر به نوبه خود از هزینه‌های سیستم بازیافت حرارت می‌کاهد. عموماً در تمامی سیستم‌های بازیابی حرارت، مطلوب نهائی آن است که میزان حرارت بازیافتی با مقدار حرارت مورد نیاز تطابق داشته باشد. در صورتی که چنین نباشد، می‌توان از سیستم‌های ذخیره حرارت که عموماً بزرگ و گران قیمت هستند، استفاده نمود. پیش از اخذ تصمیم در مورد بازیابی حرارت از یک سیستم تبرید باید ارزیابی دقیق و کاملی انجام پذیرد.

۹-۲- ذخیره حرارتی

در مرحله طراحی باید امکانات حاصل از به کارگیری یک سیستم ذخیره حرارت به دقت مورد نظر قرار گیرد. اقتصادی بودن طرح به شدت به میزان تعرفه‌های مصرف برق بستگی دارد. مزایای بالقوه اصلی عبارتند از:

- تأسیسات تبرید کوچکتر؛ زیرا با استفاده از سیستم‌های ذخیره می‌توان حداکثر تقاضاهای لحظه‌ای را کاهش داد.
- کارآیی بهبود یافته تحت بار جزئی، چرا که در این صورت کمپرسورها می‌توانند تحت بار کامل کار کنند و سپس خاموش شوند.
- کاهش هزینه‌های کاری، از طریق فراهم آمدن امکان کار با تعرفه‌های مصرف برق ارزانتر در دوره‌های طولانی‌تر و همچنین کاهش هزینه برق مربوط به حداکثر تقاضای لحظه‌ای.
- کار تحت بار ثابت سبب کاهش هزینه تعمیر و نگهداری می‌شود. به سبب کاهش تعداد قطع و وصل‌های کمپرسور).

شیوه‌های ذخیره گرما عبارتند از:

- ذخیره توسط یخ: که در آن یخ را روی صفحات یا لوله‌هایی ایجاد می‌کنند و متعاقب آن جهت تهیه آب سرد، یخ‌ها را ذوب می‌نمایند.
- ذخیره توسط آب: ذخیره حرارت در آب موجود در مخازن، طی دوره‌هایی که تقاضا اندک است.
- استفاده از لختی حرارتی محصولات^{۱۱}، (منظور از لختی کالاها در یخچال‌های سرد و بسیار سرد این است که می‌توان میزان تبرید را برای مدتی بدون آنکه دمای کالاها به نحو قابل ملاحظه‌ای متأثر شود، متوقف ساخت).
- تأخیر انداختن یا برنامه‌ریزی برای تولید محصولاتی که نیاز به سرمایش دارند.
- استفاده از موادی که تغییر حالت می‌دهند: اینگونه مواد تحت دماهای معینی که بستگی به نوع آن دارد، منجمد می‌شوند. آنها را می‌توان در طول دوره‌های کم بار (مانند شبها) منجمد نمود و سپس به آنها اجازه داد تا طی دوره‌هایی که بار به حداکثر مقدار خود می‌رسد، ذوب شوند.

۱۰- خلاصه بخش سوم: فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

- انتخاب مبرد مناسب، به نحو قابل ملاحظه‌ای بر هزینه و کارایی کلی طرح تأثیر می‌گذارد. در نظر گرفتن تأثیرات زیست محیطی انواع مبردهای CFC از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار است.
- انتخاب‌های پیچیده‌ای برای ساختار سیکل کاری تبرید وجود دارد. ارائه انتخاب‌های صحیح نیازمند ارزیابی دقیق و مفصل کلیه موارد است، تقریباً

فرصت‌های افزایش بازدهی به هنگام طراحی سیستم

این انتخاب‌ها همیشه با توجه به موقعیت مشخص کاری در محل مورد نظر تعیین می‌شوند.

- شیوه‌های کنترل یک سیستم تبرید مهم‌ترین عامل برای اجتناب از هزینه‌های اجرایی بالا هستند. یک سیستم کنترل مناسب باید به گونه‌ای باشد که دستیابی به حداکثر کارایی و بازدهی را تضمین نماید.
- بازیابی حرارتی می‌تواند یک انتخاب موثر و پرجاذبه باشد، به ویژه در صنایعی که نیاز به حرارت در دماهای نسبتاً پایین احساس می‌شود.
- سیستم‌های ذخیره حرارت می‌توانند سبب کاهش هزینه‌های اجرایی، کاری و هزینه‌های کلی طرح تبرید و برخی موارد باشند.

بخش چهارم: طراحی اجزاء

پس از بررسی موضوعات مربوط به نیازهای سرمایی و طرح کلی سیستم تبرید، اینک می‌توان نسبت به طراحی اجزاء سیستم از قبیل کمپرسورها، مبدل‌های حرارتی، شیرهای انبساط و تجهیزات کمکی دیگر توجه داشت.

۱۱- انتخاب کمپرسور و توالی راه‌اندازی آنها

یکی از مهم‌ترین اجزای یک طرح تبرید، کمپرسور است و چندان عجیب نیست که کمپرسور تأثیری اساسی بر میزان بازدهی و هزینه‌های راهبری کل سیستم داشته باشد.

انتخاب نادرست کمپرسور در مرحله طراحی می‌تواند سبب افزایشی حتی تا حدود ۳۰٪ در هزینه‌های راهبری شود. در سیستم‌های موجود که با بیش از یک کمپرسور کار می‌کنند، استفاده از یک ترتیب‌بندی بهینه برای راه‌اندازی کمپرسورها اغلب می‌تواند موجب صرفه‌جویی تا حدود ۲۰٪ در هزینه‌های راهبری شود. در بسیاری موارد می‌توان حتی بدون صرف هزینه‌های اولیه به صرفه‌جویی مذکور دست یافت. مثال‌های بسیاری وجود

دارد مبنی بر آنکه استفاده از یک کمپرسور نامناسب واقعاً بسیار گران تمام می‌شود. در این خصوص، سه موضوع عمده وجود دارد که باید به آنها اشاره شود:

- انتخاب ترکیب درستی از اندازه کمپرسورها برای کلیه شرایط کاری معمول، بدون آنکه ناچار به کار تحت بارهای جزئی گردند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- پس از انتخاب اندازه کمپرسور، بهترین نوع کمپرسور موجود را باید انتخاب نمود، زیرا گاه ماشین‌های ظاهراً مشابه، ممکن است دارای بازدهی بسیار متفاوتی باشند.
- راه‌اندازی کمپرسورها باید به صورتی ترتیب‌بندی شود که تحت هر شرایط خاص از نظر بار و دما، همواره مؤثرترین آنها در مدار قرار بگیرند.

نکته جالب توجه آن است که این انتخاب‌ها از نظر مسائل مربوط به بازدهی، مباحث متفاوتی را در بر می‌گیرند. تعیین اندازه کمپرسورها به طراحی سیستم باز می‌گردد و بهتر است در مرحله طراحی آگاهانه^{۲۲} انجام شود. انتخاب به منظور تأمین حداکثر بازدهی، در مرحله طراحی اجزاء صورت می‌گیرد و به هنگام طراحی دقیق یا زمانی که نیاز به تعویض یک کمپرسور کهنه پیش می‌آید مورد توجه قرار می‌گیرد. اگرچه ترتیب‌بندی کار کمپرسورها مسأله‌ای است که عمدتاً در مورد یک سیستم ساخته شده مطرح می‌گردد اما در عین حال این موضوع را باید در مرحله طراحی نیز مد نظر قرار داد. در بخش‌های زیر عوامل مؤثر در کارایی کمپرسورها تحت شرایط کار با بار کامل و بار جزئی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۱۱-۱- بازدهی تحت بار کامل

بازده آنترופی ثابت یک کمپرسور تحت کلیه شرایط کاری که بار کامل را به سیستم اعمال می کند یکسان نیست و به ازای شرایط مختلف تبخیر و تقطیر و نیز بسته به نوع مبرد تغییر می کند.

به عنوان مثال، وضعیت‌های زیر همگی مربوط به یک کمپرسور خاص هستند:

بازده آنترופی ثابت %	دمای تقطیر ° C	دمای تبخیر ° C	مبرد
۶۵	۳۵	۰	آمونیاک
۷۳	۳۵	-۲۰	آمونیاک
۷۶	۳۵	-۲۰	R۲۲

به نظر می‌رسد که این کمپرسورها برای کار تحت دماهای پایین با مبرد R۲۲ طراحی شده باشد. استفاده از آمونیاک در دمای پایین، از بازده کمتری برخوردار است و برای تأمین سرما در دمای تبخیر حدود ° C کارایی با آمونیاک بسیار کم است.

۱۱-۲- اطلاعات ارائه شده از سوی سازندگان

سازندگان معمولاً اطلاعات مربوط به بازده آنترופی ثابت را منتشر

نمی‌کنند. اطلاعات منتشره عموماً بر حسب ظرفیت سرمایی و توان کمپرسور به ازای حالت‌های مختلف دمای تبخیر و تقطیر، عرضه می‌گردد. کار سرمایی با فرض استفاده از کمپرسور در یک سیکل تراکمی یا بخار مبرد مربوطه تعیین می‌شود. هر سازنده مفروضاتی جهت تعیین فوق گرمایش بخار در مقطع خروجی اواپراتور یا مقطع مکش کمپرسور و همچنین در مورد مایع سرد فوق اشباع پیش از عبور از شیر انبساط را در نظر می‌گیرد. این مقادیر تأثیری بر توان مصرفی کمپرسور و یا بازده آن ندارند، بلکه تنها بر میزان ظرفیت سرمائی ارائه شده تأثیر می‌گذارند. چون این مفروضات اغلب به صورت کوچک در بخش داخل یا پشت جلد کتابچه راهنمای تجهیزات چاپ می‌شوند به آسانی ممکن است از نظر پنهان بمانند. بهتر است این موضوع با یک مثال توضیح داده شود. کمپرسورهای A و B دارای مقادیر کارآیی به شرح زیر هستند:

B	A	
۱۰۰	۱۰۰	ظرفیت سرمایی Kw
۳۲	۳۰	توان کمپرسور kW

مبرد استفاده شده در هر دو مورد، R۲۲، دمای تبخیر 10°C - و دمای تقطیر 35°C .

با استفاده از این اطلاعات به سادگی می‌توان ضریب عملکرد سیکل

کاری (ظرفیت به ازای واحد توان) را محاسبه نمود. در نگاه اول معلوم می‌شود که کمپرسور A ماشین بهتری با ضریب عملکرد ۳/۳ در مقایسه با ماشین B با ضریب عملکرد ۳/۱ است. اما باید توجه داشت که مفروضات ارائه شده توسط سازندگان در مورد هر یک از کمپرسورها به شرح زیر است:

B	A	
۲	۱۰	فوق گرمایش بخار °C
۰	۱۵	فوق سرمایش مایع °C

مقادیر زیاد فوق گرمایش و فوق سرمایش در نظر گرفته شده برای کمپرسور A موجب ایجاد ظرفیت سرمایی غیر واقعی در حدود ۱۴٪ در جدول شده است. زمانی که اثرات این عامل حذف شود و کمپرسورها بر مبنای واحدی مورد بررسی قرار گیرند، بازدهی واقعی کمپرسورها عبارت خواهد بود از:

$$A = ۰.۶۴ \quad B = ۰.۰۶۶/۴$$

یعنی در حقیقت کمپرسور B ماشین بهتری است. این مثال، اهمیت توجه به بازدهی واقعی کمپرسور را در عوض ضریب عملکرد ظاهری آن (به پیوست ۳ مراجعه شود) نشان می‌دهد. یک خریدار کمپرسور انتخاب‌های زیر را در پیش دارد:

- با استفاده از اطلاعات ارائه شده توسط سازنده در مورد بار سرمایی و توان کمپرسور، حدس و مقایسه اولیه‌ای از ضریب عملکرد سیستم به دست آورد و در عین حال از تفاوت‌های موجود در مفروضات مربوط به فوق گرمایش و فوق سرمایش غافل نشود و به خطا نیفتد.
 - بازدهی واقعی را به صورت دستی محاسبه کند.
 - با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای، به محاسبه و مقایسه بازدهی‌های واقعی بپردازد.
- مثال (۷) مزایای این شیوه را توضیح می‌دهد.

مثال ۷- انتخاب کمپرسور جانشین

طراحی نیاز به یک کمپرسور جدید دارد که بتواند به عنوان یک بوستر (یعنی کمپرسور پایین مرحله‌ای برای یک طرح دو مرحله‌ای) بین دو سطح ثابت دمایی 4°C و 15°C - عمل کند. ظرفیت سرمایی طرح ۱۰۰ کیلووات است و نیازی به کار تحت بار جزئی وجود ندارد.

در اینجا مقایسه ساده‌ای بین کمپرسورها به شرح زیر صورت می‌گیرد. از آنجا که دماهای مکش و تخلیه و نیز بار سرمائی ثابت است، کافی است بازدهی در یک نقطه کاری واحد مورد بررسی قرار گیرد. اطلاعات بدست آمده عبارتند از:

بازدهی	هزینه
اولیه (پوند)	
کمپرسور A (پیستونی)	۶۴٪
۶۰۰۰	
کمپرسور B (پیستونی)	۷۲٪
۵۲۵۰	
کمپرسور C (پیچی)	۷۶٪
۵۷۵۰	

بدیهی است که استفاده از کمپرسورهای B یا C در

مقایسه با کمپرسور A مقرون به صرفه تر است. برای انتخاب بین کمپرسورهای B و C باید تعداد ساعات کاری را در نظر گرفت. هزینه ۵۰۰ پوند اضافی کمپرسور C در کمتر از ۱/۵ سال به شرطی که این کمپرسور به طور ثابت مورد استفاده قرار گیرد، باز می‌گردد.

۱۱-۳- نمودار بازدهی کمپرسورها

اغلب تأسیسات تبرید از نظر میزان دمای تبخیر و دمای تقطیر، دارای نقطه کاری ثابتی نیستند. بسته به فرآیند و شرایط آب و هوایی، نقطه کاری طرح به طور پیوسته تغییر می‌کند. از آنجائیکه بازدهی به ازای شرایط کاری مختلف تغییر می‌کند، تعیین بازده کمپرسور در شرایط کاری مختلف، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب کمپرسوری که در سر تا سر این محدوده کاری دارای بازده نسبتاً خوبی باشد، به انتخاب ماشینی که دارای بازدهی بسیار عالی در یک نقطه کاری خاص و بازدهی کم در سایر نقاط است، ترجیح دارد.

مقایسه بازدهی بهتر است با ترسیم نمودارهای بازدهی مطابق شکل (۷) صورت گیرد. این کار با محاسبه بازدهی به ازای تعدادی از نقاط کاری و سپس ترسیم منحنی‌های بازدهی ثابت انجام می‌شود. برای رسم چنین نمودارهایی بهتر است از نرم‌افزارهای رایانه‌ای استفاده شود.

شکل ۷ - نمودارهای بازدهی ثابت در کمپرسورها

۱۱-۴- بازدهی تحت بار جزئی

چنان که پیشتر بیان شد، بازدهی کمپرسور تحت بار جزئی اغلب بسیار کمتر از بازده آن تحت بار کامل است.

اجتناب از کار کمپرسور تحت شرایط بار جزئی امری حیاتی است. این امر بهتر است در مرحله طراحی سیستم مدنظر قرار گیرد. بهتر است کلیه شرایط بار در تابستان و زمستان مورد بررسی قرار گیرند تا بتوان حدود مناسبی برای اندازه کمپرسور تعیین کرد. به عنوان مثال ممکن است استفاده از سه کمپرسور بزرگ جهت جبران بارهای سرمائی در شرایط بار کامل، به علاوه یک کمپرسور چهارم بسیار کوچک‌تر برای جبران تلفات برودتی ناچیز در روزهای تعطیل مناسب باشد. مثال (۸) کاربرد این اصول را نشان می‌دهد.

مثال ۸ - تعیین اندازه کمپرسور

پس از انجام طراحی مقدماتی برای یک تأسیسات برودتی، حداکثر مقدار بار سرمائی معادل ۳۰۰۰ کیلووات به دست آمده است. تأسیسات پیشنهادی شامل ۳ واحد، هر یک به ظرفیت ۱۵۰۰ کیلووات بود، که یکی از این واحدها تنها به عنوان

پشتیبان دو واحد دیگر و در حالت رزرو قرار می‌گرفت.

تجزیه و تحلیل دقیق‌تر بارهای سرمائی نشان داد که ظرفیت سرمایی مورد نیاز برای مدت ۲۰۰۰ ساعت در سال تنها برای ۳۰۰ کیلووات و برای ۱۰۰۰ ساعت اضافی دیگر معادل ۵۰۰ کیلووات است. مشخصه‌های کاری تحت بار جزئی نشان داد که کمپرسور تحت ۲۰٪ از بار نامی، توانی معادل ۶۰٪ توان بار کامل و تحت ۳۰٪ از بار نامی، توانی برابر ۶۸٪ توان در بار کامل را مصرف می‌کند. این تجزیه و تحلیل نشان داد که با بکارگیری تنها یک کمپرسور ۵۰۰ کیلوواتی برای کار تحت بارهای جزئی، صرفه‌جویی به میزان ۲۵۰۰۰ پوند در سال حاصل می‌گردد. کمپرسور اضافی دیگر که برای جبران تلفات در بار کامل مورد نیاز است، دارای ظرفیتی معادل ۵۰۰ کیلووات و هزینه‌ای در حدود ۱۵۰۰۰ پوند است، که به این ترتیب زمان بازگشت سرمایه کمتر از یک سال خواهد بود.

۱۱-۵- ترتیب گذاری کمپرسورها

برآورد بازدهی برای تأسیسات تبرید موجود به اندازه تعیین بازدهی طرح‌های جدید اهمیت دارد. ممکن است بتوان با استفاده از بهترین کمپرسور موجود در بازار به جای کمپرسوری که بازدهی کمتری دارد و بدون صرف سرمایه اولیه زیاد، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را به دست آورد. به مثال (۹) توجه کنید.

بازدهی و ظرفیت هر کمپرسور را بهتر است برای محدوده‌ای از شرایط محاسبه و در یک جدول درج نمود. بهتر است وضعیت کارآیی تحت بار جزئی در مورد کمپرسورهایی که با ظرفیت متغیر کار می‌کنند، در نظر گرفته شود. در این صورت امکان تعیین یک ترکیب بهینه از کمپرسورها برای بارهای مختلف سرمایی و شرایط مختلف آب‌وهوایی وجود خواهد داشت. این ترکیب‌های بهینه را می‌توان به صورت دستی انتخاب نمود یا در صورت امکان از یک سیستم کنترل خودکار برای انتخاب ترتیب‌گذاری استفاده نمود.

مثال ۹- ترتیب‌گذاری کمپرسورها

یک کارخانه تولید ماء‌الشعیر دارای دو واحد بزرگ برای سرد کردن گلیکول بود، که یکی از آنها از یک کمپرسور پیچی جدید و پیشرفته و دیگری از یک کمپرسور قدیمی ۲۰ ساله چند مرحله‌ای گریز از مرکز استفاده می‌کرد. کمپرسور جدید همواره بیش از واحد قدیمی مورد استفاده قرار می‌گرفت و قادر بود که بار سرمایه‌ی کامل سیستم را در مدتی معادل ۷۵٪ از کل سال تأمین کند.

تحلیلی که بر این دو واحد صورت گرفت، نشان داد که ماشین قدیمی از بازدهی بسیار بیشتری نسبت به ماشین جدید برخوردار است و به سادگی با قرار دادن کمپرسور قدیمی به عنوان واحد اصلی، صرفه‌جویی سالانه‌ای معادل ۵۰۰۰۰ پوند حاصل شد. در این حالت از کمپرسور پیچی تنها در زمان کار تحت بارهای حداکثر استفاده شد. از نظر اقتصادی جایگزینی کمپرسور پیچی با یک ماشین بهتر مقرون به صرفه نبود، ولی تنها با انتخاب ترتیب‌گذاری بهینه نتیجه بسیار خوبی گرفته شد.

۱۱-۶- ملاحظات مالی

بهره‌گیری از فرصت‌های ممکن برای انتخاب درست کمپرسورها و ترتیب‌گذاری صحیح در راه‌اندازی آنها اغلب خیلی زود به مرحله سوددهی می‌رسد و در برخی موارد حتی نیاز به صرف هزینه‌های زیاد نیز ندارد. ارائه مقادیر واقعی در این زمینه غیر ممکن است چرا که نظرات ارائه شده در این بخش، برای کمپرسورهای از یک اسب بخار تا پانصد اسب بخار به یک میزان صادق است.

به نظر می‌رسد که ارتباط اندکی میان هزینه اولیه کمپرسور و بازدهی آن وجود داشته باشد. این احتمال وجود دارد که یک کمپرسور با بازدهی خوب حتی ارزان‌تر از یک کمپرسور با بازدهی کم باشد. انتخاب خوب یک کمپرسور می‌تواند موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود. حتی اگر ماشین بهتر، گرانتر هم باشد، باز بعید است که دوره بازگشت سرمایه اضافی یک سال بیشتر شود.

هزینه‌های اولیه لازم برای استفاده از شیوه‌های کنترل ترتیب‌گذاری مناسب، معمولاً بسیار اندک و یا اصولاً مجانی است. اگرچه خریداری یک کمپرسور کوچک جهت کار تحت شرایط بار جزئی، هزینه‌ای اضافی دارد، اما از آنجایی که کارایی کمپرسورهای بزرگ تحت بارهای جزئی بسیار کم است، در صورت طولانی بودن زمان کار سیستم در حالت کم‌باری، می‌توان دوره بازگشت سرمایه بسیار خوبی (کمتر از یک سال) را انتظار داشت.

۱۲- انتخاب و تعیین اندازه مبدل‌های حرارتی

در صورتی که قرار باشد میزان مصرف انرژی یک طرح تبرید به حداقل مقدار خود برسد، بدیهی است که حداقل رساندن افزایش دمای مبرد در

سیکل تبرید^{۲۳} در آن طرح از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود. این به معنای انتخاب بالاترین مقدار ممکن برای دمای تبخیر و پایین‌ترین مقدار ممکن برای دمای تقطیر است، البته در این بین محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. مثلاً اگر لازم باشد که محصولات تا دمای 5°C سرد شوند، بدیهی است که دمای تبخیر مبرد باید کمتر از 5°C اختیار شود. به طریقی مشابه در صورتی که خنک‌ترین جریان هوای موجود در محیط اطراف دارای دمای مرطوب هوا^{۲۴} معادل 20°C در تابستان باشد، آنگاه دمای تقطیر باید بیش از 20°C باشد. البته طراح می‌تواند اختلاف بین دمای تبخیر و محیط تحت سرمایش و همچنین اختلاف بین دمای تقطیر و محیط اطراف را به اختیار خود برگزیند. او به عنوان مثال می‌تواند برای شرایط فوق‌الذکر دمای تقطیری برابر 30°C انتخاب نماید. کندانسور مناسب برای این امر، ارزانتر از حالتی است که دمای تقطیر 25°C اختیار شود، ولی در عوض هزینه‌های کارکردی مجموعه تأسیسات بیشتر خواهد شد. این بخش به بحث پیرامون موضوعاتی در زمینه بهینه‌سازی این اختلاف دماها و چگونگی انتخاب اندازه مبدل حرارتی می‌پردازد.

۱۲-۱- تأثیر اندازه مبدل‌های حرارتی

افزایش دمای مبرد در یک چرخه تبرید (Temperature Lift) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{Temperature Lift} = \text{Intrinsic Lift} + T_{\text{evap}} + T_{\text{cond}}$$

افزایش ذاتی دما (Intrinsic Lift) عبارت است از اختلاف دمای میان محیط سرد و محیط گرم اطراف (یعنی دمای 25°C در مثال فوق).

²³ - Temperature lift

²⁴ - Wet Bulb

(T cond) و (T evap) به ترتیب اختلاف دماهای موجود در اواپراتور و کندانسور می‌باشند.
نرخ انتقال حرارت Q در یک اواپراتور بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = U A \Delta T$$

که در آن U ضریب انتقال حرارت کلی و A سطح تبادل گرماست. جهت به حداقل رساندن ΔT به ازای مقدار معین Q لازم است سطح مبدل حرارتی A یا مقدار U افزایش یابد.

تغییر در اختلاف دمای یک اواپراتور یا کندانسور اثرات مختلفی بر عملکرد و هزینه کلی طرح دارد. مهمترین این اثرات عبارتند از:

- هزینه‌های کارکرد کمپرسور: استفاده از کندانسور و یا اواپراتور بزرگ، افزایش دمای مبرد در سیکل تبرید، در نتیجه توان مصرفی کمپرسور را کاهش می‌دهد.

- هزینه‌های اولیه مبدل حرارتی: هزینه خریداری یک کندانسور یا اواپراتور بزرگ‌تر بیشتر است.

- هزینه‌های اولیه کمپرسور: استفاده از یک اواپراتور بزرگ سبب افزایش فشار تبخیر می‌شود و در نتیجه می‌توان از یک کمپرسور با حجم جابجایی کمتر استفاده کرد. این مسأله می‌تواند به کاهش هزینه کمپرسور بیانجامد.

- توان مصرفی سیستم‌های جانبی: استفاده از یک مبدل حرارتی بزرگ‌تر، نیاز به استفاده از پمپ و یا پنکه‌های بزرگ‌تر برای عبور سیالهای واسط و یا هوا از درون آن دارد.

در یک تحلیل به منظور بهینه‌سازی، دو اثر اول بحرانی‌ترین موارد

هستند. در صورت استفاده از یک مبدل حرارتی بزرگتر، صرفه‌جویی حاصله در مصرف انرژی الکتریکی باید بتواند افزایش هزینه‌های اولیه را جبران نماید. موارد سوم و چهارم یاد شده در بالا، دارای آثار ثانویه هستند ولی در وضعیت‌های معینی می‌توانند حایز اهمیت باشند و باید همواره مدنظر قرار گیرند.

میزان تأثیر هر یک از عوامل فوق‌الذکر، بستگی کامل به شرایط ویژه مجموعه تأسیسات موردنظر دارد. به عنوان مثال امکان بهبود هزینه‌های کارکرد در مورد طرحی با اختلاف دمای کم بین محیط سرد و محیط اطراف (مانند یک سیستم سرمایش آبی) نسبت به طرحی که اختلاف دمای زیادی دارد (مانند یک سیستم یخ‌ساز دمشی) بیشتر است. با وجود آن که در یک سیستم کم‌دما امکان بهبود در میزان توان مصرفی کمپرسور کمتر است، اما بهبود حاصل در حجم جابجایی کمپرسور مورد نیاز قابل توجه‌تر است. مثال‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ این نکات را نشان می‌دهند.

مثال ۱۰- انتخاب اواپراتور برای سیستم با افزایش کم‌دما
نیازهای فرآیند: سرد کردن محلول نمک از دمای 0°C تا $3^{\circ}\text{C}-$
بار سرمایی معادل ۱۰۰ کیلووات
مبرد از نوع آمونیاک
دوره کارکرد معادل ۶۰۰۰ ساعت در سال
هزینه برق مصرفی معادل ۴ پوند به ازای هر
کیلووات ساعت
دمای ثابت تقطیری معادل 30°C مفروض است. در
اینجا عملکرد

طرح به ازای مقادیر مختلف دمای تبخیر (T_e) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند:

(T_e)C	ضریب عملکرد cop	سطح اواپراتوری m^2	قیمت اواپراتوری (پوند در سال)	هزینه کارکرد کمپرسور (m^3/s)	حجم جابجایی COP
-5	4/3	54	8700	5616	31%
-8	3/8	28	5800	6240	31%
-11	3/5	19	4600	6914	39%
-14	3/2	14	3900	7584	45%
-17	2/9	12	3400	8304	50%

این نتایج دمای تبخیر بهینه‌ای در حدود $8^\circ C$ - را نشان می‌دهند. سرمایه‌گذاری اضافی 1200 پوندی که برای تغییر دما از $11^\circ C$ تا $8^\circ C$ لازم است در کمتر از 2 سال باز می‌گردد. اگرچه ایجاد دمای $5^\circ C$ - از دیدگاه مهندسی کاملاً امکان‌پذیر است، ولی در این حالت سطح بیشتری بار انتقال حرارت لازم خواهد بود. با این انتخاب، هزینه صرف شده در مدتی بیش از 4/5 سال جبران خواهد شد که از نظر اغلب استفاده‌کنندگان غیر قابل قبول است. همچنین جالب توجه است، که تغییر اندازه کمپرسور در برخی موارد می‌تواند موجب کاهش نسبی در هزینه‌های اولیه گردد. ضریب عملکرد به ازای دماهای تبخیر و تنظیم مختلف را می‌توان بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط سازندگان یا از طریق محاسبه به کمک خواص ترمودینامیک هر مورد خاص (با مراجعه به متون استاندارد) به دست آورد. اندازه صحیح اواپراتور تابعی از ساعات

عملکرد و قیمت برق است.

مقدار توان مصرفی لوازم جانبی به نوع سیالی که باید خنک شود بستگی دارد. در یک سیستم سرماساز آبی، توان پمپاژ اضافی لازم جهت کار با یک اواپراتور بزرگتر، بسیار اندک است. در عوض در یک سرماساز بزرگتر گلیکولی ممکن است توان پمپاژ اضافی بسیار بیشتری مورد نیاز باشد. علت این امر آن است که گلیکول در مقایسه با آب دارای گرانشی بیشتر است و در نتیجه توان پمپاژ بسیار بالاتری را می‌طلبد.

مثال ۱۱- انتخاب کندانسور با سیستم با افزایش کم دما

برای سرماساز مورد بحث در مثال ۱۰، دمای تبخیر T_e را در 8°C تثبیت نموده و عملکرد کندانسور را با فرض مقادیر دمای 232°C و 26°C برای جریانهای ورودی و بازگشتی آب خنک‌کاری مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهیم.

ضریب عملکرد (T_e) $^\circ\text{C}$	سطح کندانسور	قیمت کندانسور (پوند)	هزینه کارکرد (پوند در سال)	حجم پمپ شده توسط کمپرسور (m^3/s)
COP	m_2	(پوند)	(سال)	

۰/۰۳۵	۵۸۵۵	۵۶۵۰	۲۷	۴/۱	۲۸
۰/۰۳۵	۶۴۳۲	۳۸۰۰	۱۴	۳/۷	۳۱
۰/۰۳۶	۷۰۰۸	۳۰۰۰	۹	۳/۴	۳۴
۰/۰۳۶	۷۶۳۲	۲۵۵۰	۷	۳/۲	۳۷
۰/۰۳۷	۸۲۰۸	۲۲۵۰	۶	۲/۹	۴۰

باز هم با افزایش مبدل حرارتی بهبود قابل توجهی در هزینه‌های عملیاتی و ضریب عملکرد سیستم مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که کاهش قابل توجهی در اندازه کمپرسور روی نداده است، زیرا این امر تنها تابع دمای تبخیر است. اندازه بهینه کندانسور باید بر مبنای دمای تقطیر در حدود 31°C تا 28°C تعیین گردد.

دوره افزایشی بازگشت سرمایه	(T _e) °C
بر حسب سال	۳۱
۱/۴	۲۸
۳/۲	

یک انتخاب خوب احتمالاً دمای تقطیری برابر 30°C خواهد

داشت.

مثال ۱۲- انتخاب اواپراتور برای سیستم با افزایش زیاد دما
نیازهای فرآیند: سرمایش هوا بین دماهای -20°C تا
 -22°C
بار سرمایی معادل ۱۰۰ کیلو وات
طرح تبرید تک مرحله‌ای با مبرد R22
دوره کارکرد معادل ۸۰۰۰ ساعت در سال
قیمت برق مصرفی معادل ۴ پوند به ازای هر
کیلووات ساعت مقدار T_e ثابت و برابر 30°C در نظر گرفته شده
است.

حجم پمپ	هزینه	قیمت	سطح	ضریب	$(T_e)^{\circ}\text{C}$
شده	کارکرد	اواپراتور	کندانسور	عملکرد	$^{\circ}\text{C}$
توسط	(پوند در	(پوند)	m^2	COP	
کمپرسور	سال)				

(m ³ /s)					
۰/۰۸۳	۱۵۱۶۸	۷۵۰۰	۶۲۵	۲/۱	-۲۸
۰/۰۹۰	۱۶۳۲۰	۶۰۵۰	۴۳۶	۲	-۳۱
۰/۰۱۰۳	۱۷۶۰۰	۵۱۵۰	۳۳۵	۱/۸	-۳۴
۰/۱۷۷	۱۸۸۸۰	۴۵۵۰	۲۷۲	۱/۷	-۳۷
۰/۱۳۸	۲۰۲۲۸	۴۱۰۰	۲۲۹	۱/۶	-۴۰

این اطلاعات نشان می‌دهد که زمان بازگشت سرمایه حتی برای بزرگترین مبدل حرارتی داده شده نیز مناسب است. بهتر است امکان استفاده از مبدلهای حرارتی بزرگتر را نیز مورد توجه قرار داد.

چون در این طرح افزایش دمای مبرد در سیکل تبرید زیاد است، فرصتهای خوبی برای کاهش اندازه کمپرسور وجود دارد. به عنوان مثال، کمپرسوری که به ازای $T_e = -28^\circ C$ انتخاب می‌شود، ۴۰٪ کوچکتر از کمپرسوری است که به ازای $T_e = -40^\circ C$ برگزیده می‌شود.

۱۲-۲- ملاحظات مالی

این موضوعی قابل درک است که پیمانکاران تأسیسات تبرید زمانی که در مناقصه‌ها شرکت می‌کنند سعی در هر چه پایین‌تر نگهداشتن هزینه‌های طرح دارند، که این امر طبیعتاً به انتخاب مبدل‌های حرارتی کوچکتر منجر می‌گردد. خریدار باید «کل هزینه مالکیت طرح» را به گونه مناسبی برآورد نماید. این هزینه‌ها شامل مجموع هزینه‌های اولیه و هزینه‌های کارکرد مورد انتظار در طول عمر کاری طرح است. بهترین حالت آن است که خریدار (یا یک مشاور مستقل) پیش از اعلام مناقصه، اقدام به یک بررسی دقیق برای تعیین اختلاف دمای بهینه برای اواپراتور و کندانسور نموده و موارد را به عنوان پیش شرط مناقصه به پیمانکاران شرکت کننده در مناقصه اعلام نماید.

میزان هزینه برق مصرفی، یک عنصر حیاتی در تحلیل‌های اقتصادی و مالی است. اغلب طرح‌های تبرید حداقل ۱۵ سال کار می‌کنند؛ برخی از مجموعه‌های نصب شده در انگلستان عمری ۳۰ ساله دارند. در طول عمر یک طرح، هزینه مصرف برق افزایش می‌یابد. در طی ۱۰ سال آینده افزایش قیمت‌ها ممکن است بالاتر از نرخ عمومی تورم باشد. این امر چند عامل دارد که یکی از آنها فشارهای فزاینده از سوی محافل زیست محیطی جهت کاهش آلودگی CO₂ ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌هاست. به حساب آوردن امکان افزایش هزینه برق مصرفی در ارزیابی مالی طرح حائز اهمیت بوده و سبب تشویق مصرف‌کنندگان برای خریداران تجهیزات کار آتر برای تأسیسات می‌شود.

همواره باید میزان واقعی استفاده از تأسیسات را در طول سال در نظر داشت. در صورتی که قرار باشد مبدل‌های حرارتی در مدت ۲۴ ساعت در روز و در طول کار سال (مانند اواپراتورهای سردخانه‌ها) در حال کار باشند،

هزینه‌های کارکرد آنها یک موضوع بحرانی خواهد بود. اما اگر به عنوان مثال طرح تبرید تنها ۱۰۰۰ ساعت در طول سال کار می‌کند، آنگاه توجهیه استفاده از مبدل‌های حرارتی بزرگ امری دشوار خواهد بود.

۱۲-۳- استفاده از مبدل‌های حرارتی با ضریب انتقال حرارتی بالا

هدف از بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی، به حداقل رساندن اختلاف دما میان محیط سرد و دمای تبخیر مبرد و نیز اختلاف میان دمای تقطیر و دمای محیط است. این امر با افزایش اندازه مبدل حرارتی و یا افزایش مقدار U (ضریب انتقال حرارت) میسر خواهد شد.

مقدار U بستگی به نوع مبدل حرارتی و ویژگی‌های مختلف طراحی آن دارد. استفاده از یک مبدل حرارتی مسطح به جای یک مبدل حرارتی پوسته-لوله‌ای، به افزایش مقدار U به ازای هزینه اولیه یکسان می‌انجامد. انتخاب صحیح سطوح گسترش یافته، مانند شکل پره‌ها و فاصله میان آنها روی کویل‌های خنک شونده با هوا و یا استفاده از لوله‌های متخلخل که سبب جوشش بیشتر می‌شوند، نیز می‌تواند موجب بهره‌وری بیشتر از هزینه شود.

توجه به کاهش کارآیی مبدل‌های حرارتی که بر اثر جرم‌گرفتگی به وجود می‌آید از اهمیت زیادی برخوردار است. تأثیر جرم‌گرفتگی در مبدل‌های حرارتی خاصی که ضریب انتقال حرارتی بالائی دارند اغلب شدیدتر است. به عنوان مثال فاصله کم میان پره‌های یک خنک‌کننده هوایی سبب افزایش مقدار U می‌شود. البته وجود فاصله اندک میان پره‌های یک مبدل حرارتی موجب افزایش احتمال برفک‌گیری در آن می‌شود. تشکیل اندکی برفک در فاصله میان پره‌ها می‌تواند سبب ایجاد یک پل بین هر دو پره متوالی و در نتیجه مسدود شدن این فواصل و جلوگیری از عبور جریان هوا از میان آنها شود که در نتیجه موجب

کاهش انتقال حرارت می‌گردد.

۱۲-۴- کاهش میزان اختلاف دمای ذاتی بین محیط‌های سرد و گرم به عنوان بخشی از فرآیند انتخاب مبدل حرارتی باید تلاش زیادی در جهت کاهش اختلاف دمای ذاتی بین محیط‌های سرد و گرم به عمل آید. این امر به ویژه هنگام انتخاب کندانسور اهمیت زیادی دارد. در مورد کندانسور هوائی، دمای تقطیر تابع دمای خشک هوای محیط است در حالی که در یک کندانسور پوسته-لوله‌ای (که به یک برج خنک‌کن متصل است) با یک کندانسور تبخیری، دمای تقطیر به دمای مرطوب هوای محیط وابسته است.

از آنجایی که همواره و به ویژه در تابستان‌ها دمای خشک هوا بالاتر از دمای مرطوب هوا است، اختلاف دمای ذاتی برای کندانسورهایی که با هوا خنک می‌شوند، همیشه بالاتر از میزان افزایش دمای ذاتی برای کندانسورهای تبخیری است. به طور کلی انتظار می‌رود که استفاده از کندانسور تبخیری با صرفه‌تر باشد زیرا حداقل دمای تقطیر را فراهم می‌آورند. در مورد بخش تحت سرمایش سیستم، همیشه از خود بپرسید که آیا درجه حرارت مورد نیاز برای محیط سرد را می‌توان بیشتر در نظر گرفت یا خیر. به عنوان مثال، در صورتی که فرآیند سرمایش را بتوان تحت دمایی مثلاً 10°C - به جای 12°C - انجام داد، اختلاف دمای ذاتی کاهش یافته و در نتیجه کارایی سیستم افزایش می‌یابد.

همچنین بهتر است حتی‌الامکان کوشش گردد که اختلاف دمای ورودی و خروجی مایع تحت سرمایش به حداکثر برسد. به عنوان مثال فرآیند سرمایش مقدار 5 kg/s آب از دمای 4°C به 3°C و ظرفیت سرمایی برابر 21 کیلووات است. بدیهی است که به ازای یک اواپراتور با اندازه و نوع

معین (یعنی مقدار UA یکسان) دمای تبخیر مبرد در حالت دوم نسبت به حالت اول بیشتر خواهد بود و کارایی اضافه می‌گردد.

۱۲-۵- توان مصرفی توسط تجهیزات جانبی

هنگام انتخاب یک مبدل حرارتی، میزان توان مصرف پمپ‌ها و دمنده‌های متصل به اواپراتور یا کندانسور را نیز باید به حساب آورد. به طور کلی هر چه مبدل حرارتی بزرگتر باشد، توان مصرفی تجهیزات جانبی نیز بیشتر خواهد شد. این توان مصرفی اضافی را باید با در نظر گرفتن صرفه‌جویی‌های ناشی از انتخاب کمپرسور جبران نمود. نکته جالب توجه این است که در بسیاری از حالات امکان کاهش توان کمکی با جلوگیری از افت فشار اضافی در طراحی مبدل حرارتی کاملاً تامین می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌گردد که به عنوان اولین قدم، ابتدا اندازه مبدل حرارتی بهینه شود و سپس برای کاهش و به حداقل رساندن توان مصرفی در تجهیزات جانبی اقدام مناسب به عمل آید.

۱۳- انتخاب شیر انبساط

انتخاب و عملکرد شیر انبساط تأثیر قابل توجهی بر کارایی و هزینه‌های عملکرد یک طرح تبرید دارد. ۶ نوع اصلی شیر انبساط وجود دارد که می‌توان از آنها در یک مدار تبرید استفاده نمود:

- شیر انبساط دستی؛
- لوله مویین؛
- شیر انبساط حساس به دما (ترموستاتیکی)؛

- شیر شناوری برای کنترل بخش کم فشار^{۲۵}
- شیر شناوری برای کنترل بخش پرفشار؛
- شیر انبساط الکترونیکی.

وظیفه شیر انبساط، تنظیم نرخ جریان مایع مبرد از کندانسور به اواپراتور، با توجه به بار سرمائی و میزان پمپاژ کمپرسور است، که به منظور حفظ اختلاف فشار لازم میان بخش‌های فشار پایین و فشار بالای سیستم صورت می‌گیرد.

شیرهای انبساط دستی ولوله‌های مویین امکان کنترل خودکار جریان را فراهم نمی‌کنند. سایر شیوه‌های یاد شده، کنترل جریان را بر اساس فشار اواپراتور، دمای فوق گرمایش مورد نیاز و ارتفاع اواپراتور، کندانسور و منبع ذخیره مبرد^{۲۶} امکان پذیر می‌سازند.

یک شیر کنترل خودکار جریان مبرد، در صورتی که در وضعیت ایدآل خودکار کند، باید همواره اواپراتور را پر از مایع و کندانسور را در وضعیت خشک نگهدارد و در عین حال باید از نفوذ مایع مبرد به کمپرسور جلوگیری نماید. تحقق این امر تحت کلیه شرایط باری، سبب ایجاد بالاترین دمای تبخیر و پایین‌ترین دمای تقطیر می‌شود که خود به تأمین حداکثر ضریب عملکرد ممکن و حداقل هزینه‌های کارکرد می‌انجامد. در بخش‌های زیر دو جنبه مهم در طراحی سیستم‌های تبرید که در رابطه با انتخاب شیر انبساط به منظور بهره‌وری هر چه بیشتر انرژی می‌باشد، به طور مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. این دو جنبه عبارتند از: (۱) استفاده از کنترل فشار تخلیه کمپرسور. (۲) بررسی امکان استفاده از شیرهای انبساط الکترونیکی بجای شیرهای انبساط ترمواستاتیک.

²⁵ - Float – level Control Valve

²⁶ - Receiver

۱۳-۱- اجتناب از کنترل فشار تخلیه کمپرسور

در سیستم‌های تبرید تجاری و صنعتی جدید، استفاده از کنترل فشار تخلیه کمپرسور (HPC^{۲۷}) امری متداول و مرسوم است. هدف آن است که از افت فشار تقطیر در شرایط محیطی سردتر جلوگیری شود و برای این کار از شیوه‌های مختلفی جهت تثبیت نسبی فشار تقطیر در طول سال استفاده می‌شود.

دلیل عمده استفاده از HPC، اجتناب از مشکلات خاص مرحله طراحی به روش ساده است. دلیل عمده دیگر آن است که کارکرد درست شیرهای انبساط ترموستاتیک نیازمند ثابت بودن فشار مایع مبرد است. سایر دلایل عمومی عبارتند از بهبود کیفیت برفک زدایی توسط گاز داغ و مهیا نمودن فشار کافی جهت حرکت مایع مبرد در سیستم‌های پیچیده و تأسیسات یکپارچه بزرگ.

استفاده از HPC امری است که موجب اتلاف انرژی بسیار می‌شود و بهتر است حتی‌المقدور از آن اجتناب شود. این بخش به بحث در خصوص احتمال انرژی در این شیوه و راههای پیشنهادی جهت جلوگیری از آن می‌پردازد.

مثال (۱۳) مزایای این روش را توضیح می‌دهد.

مثال ۱۳- حذف فشار تخلیه اضافی

یک سیستم بزرگ تولید و نگهداری مواد غذایی از سیستم برفک‌زدایی با آب داغ روی سیستم تبرید با مبرد آمونیاک

استفاده می‌کند. برفک‌زدایی باید درون سردخانه‌ای که ۱۰ اواپراتور داشت صورت می‌گرفت. مبرد آمونیاک بکار رفته در سیستم، بارهای سرمائی سیستم را که بخش زیادی از آن اصولاً نیازی به برفک‌زدایی ندارد، تأمین می‌نماید. جهت افزایش کارایی در اوقات زمستانی، میزان فشار تخلیه در حدی معادل ۱۴۰psig تثبیت شده است. بار اعمال شده به کمپرسور در این وضعیت ۱/۲ مگاوات است که تحت شرایط آب و هوایی گرمتر تا مقدار حداکثری معادل ۴ مگاوات نیز افزایش می‌یابد.

هزینه دستیابی به یک فشار تخلیه بالا بسیار پرهزینه است. اگر امکان استفاده از یک فشار تخلیه متغیر موجود بود آنگاه فشار تقطیر در اوقات زمستانی به ۹۰psig کاهش می‌یافت و این امر موجب صرفه‌جویی معادل ۵۷۰۰۰ پوند در سال می‌گردید. اصلاحاتی جهت تنظیم فشار پشت شیر صورت گرفت که اجازه داد فشار تخلیه (تا مقدار ۱۲۰psig) کاهش یابد. این عمل، در کنار آزاد گذاردن فشار تخلیه و به هنگام عدم نیاز به برفک‌زدایی، موجب صرفه‌جویی معادل ۴۰۰۰۰ پوند در سال گردید.

۱۳-۲- علت و میزان اتلاف انرژی

میزان مصرف انرژی یک طرح تبرید رابطه بسیار نزدیکی با اختلاف بین دماهای تبخیر و تقطیر دارد. دمای طراحی تقطیر همواره چند درجه بالاتر

از دمای محیط اطراف کندانسور است و از آنجا که این محیط معمولاً هوا (در کندانسورهایی که توسط هوا خنک می‌شوند) یا آب خنک کن (در کندانسورهای تبخیری پوسته‌ای - لوله‌ای) است، لذا دمای تقطیر طراحی چند درجه‌ای بیش از مقادیر دمای خشک هوا یا مرطوب تابستانی می‌باشد. این مسأله موجب ایجاد دمای تقطیری معادل 40°C در کندانسورهای هوایی و دمایی در حدود 30°C برای کندانسورهای آبی می‌شود.

میزان دمای تابستانی فقط چند ساعت در طول سال به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در سایر اوقات، دمای تقطیر می‌تواند پایین‌تر از مقدار طراحی شده باشد. در زمستان‌ها ممکن است این دما تا 10°C یا پایین‌تر نیز افت کند. در صورتی که تأسیسات مورد نظر دارای فشار تخلیه متغیر باشد، در اوقات زمستانی از ضریب عملکرد بسیار بالاتری نسبت به مقادیر طراحی برخوردار خواهد بود، که این به سبب وجود دمای تقطیر پایین‌تر حاصل می‌گردد.

البته اگر از روش HPC استفاده شود، آنگاه دمای تقطیر در کل طول سال معادل اوقات تابستانی بوده و اتلاف انرژی به ویژه زمانی که افزایش دمای مبرد در طی سیکل تبرید کم است، بسیار عظیم خواهد بود. در این حالت، اتلاف توان کمپرسور می‌تواند تا حدود ۲۰ تا ۳۰٪ ظرفیت آن باشد.

۱۳-۳- روش‌های کنترل فشار تخلیه

کنترل فشار تخلیه (HPC)، با کاهش مصنوعی توانایی انتقال حرارت کندانسور انجام می‌شود. در این روش با استفاده از یک حساسه تعیین می‌شود که آیا فشار تخلیه خیلی کم است یا خیر، و در صورت وقوع این امر، مکانیزم HPC فعال می‌شود. این عمل معمولاً به صورت‌های زیر صورت می‌گیرد:

دمنده‌ها روشن و خاموش می‌شوند یا شیرهای ذخیره مایع سرد باز و بسته می‌گردد	در کندانسورهایی که با هوا خنک می‌شوند:
شیرگذر فرعی سه راهه در طول مسیر رفت یا برگشت آب خنک کننده باز می‌شود	در کندانسورهایی که توسط آب خنک می‌شوند:
دمنده‌ها یا پمپ‌های آب روشن و خاموش می‌شوند و یا شیرهای ذخیره مایع سرد باز و بسته می‌گردند	در کندانسورهای تبخیری:
مسیر ورودی به یک یا تعداد بیشتری از کندانسورها بسته می‌شود	در تأسیساتی که شامل چندین کندانسور هستند:

یک شیر ذخیره مایع مبرد، جلوی جریان خروجی مایع مبرد از کندانسور را می‌گیرد. این امر سبب پرشدن قسمتی از کندانسور توسط

مایع مبرد و در نتیجه کاهش سطح مؤثر تقطیر می‌گردد.

۱۳-۴- شیرهای انبساط حساس به دما (ترموستاتیکی) TEV
TEVها به طور گسترده‌ای در سیستم‌های تبرید کوچک و متوسط و جهت تنظیم جریان ورودی مایع مبرد به اواپراتورهای انبساط مستقیم به کار می‌روند. به عنوان مثال استفاده از آنها در سردخانه‌ها، آب سردکن‌های به کار رفته در سیستم‌های تهویه مطبوع، سرماسازی مورد استفاده در فرآیندها و یخچال‌های فروشگاه‌های متداول است. در سیستم‌های تبرید کوچک یا متوسط (با توانی بین ۱ تا ۱۰۰ اسب بخار) این شیرها پرمصرف‌ترین دستگاه‌های انبساط دهنده هستند، چرا که به سادگی نصب می‌شوند و نسبتاً ارزان قیمت می‌باشند.

اگر چه شیرهای انبساط ترموستاتیکی در شرایط نامی، امکان کنترل مؤثری را فراهم می‌آورند، اما نمی‌توانند خود را به گونه‌ای کارآ با تغییرات شرایط کاری سیستم وفق دهند. این تغییرات شامل تغییر در دماهای تقطیر و تبخیر می‌باشند.

برای قرار گرفتن شیر در یک وضعیت معین، برای دماهای تبخیر پایین‌تر فوق گرمایش بیشتری لازم است. در سیستم‌هایی که دمای تبخیر متغیر دارند، شیر باید چنان تنظیم شود که فوق گرمایش قابل قبولی را برای کلیه شرایط ممکن اعمال نماید. البته در مواقعی که اواپراتور تحت بار کمی کار می‌کند، وقوع فوق گرمایش بیش از حد، اجتناب ناپذیر است.

شاید موضوع مهم‌تر این باشد که جریان عبوری از شیر انبساط نه تنها تابع وضعیت تعیین شده توسط اواپراتور برای شیر است، بلکه در عین حال، تابع میزان افت فشار در کندانسور و اواپراتور نیز می‌باشد. شرایطی را در نظر بگیرید که در آن، دمای تبخیر ثابتی معادل 10°C و دمای تقطیر

متغیری بین مثلاً 20°C در زمستان و 40°C در تابستان وجود داشته باشد. چون تغییرات ایجاد شده در افت فشار برای حالات مذکور بسیار زیاد است (برای مبرد R12 افت فشار در حدود ۵ بار در زمستان و حدود ۱۱ بار در تابستان می‌باشد)، شیرهای انبساط ترموستاتیکی عملاً قادر به تطبیق خود با این محدوده گسترده از تغییرات نیستند. راه حل رایج برای رفع این مشکل آن است که در شرایط محیطی سرد، فشار تقطیر را به طور مصنوعی افزایش دهند.

۱۳-۵- روشهای غیر از TEV برای کنترل فشار تخلیه

برای اجتناب از اتلاف انرژی لازم است درباره استفاده از TEVها تجدید نظر شود و در صورت امکان بهتر است از انواع دیگر شیرهای انبساط استفاده شود. در صورتی که امکان این امر فراهم نباشد، ممکن است دستیابی به صرفه‌جویی‌های نسبی از طریق کاهش نقاط تنظیم HPC عملی باشد. بدیهی‌ترین جایگزین برای شیرهای انبساط معمولی، انواع جدیدی از شیرهای انبساط الکترونیکی است که اخیراً در دسترس قرار گرفته است و در آنها از مدارهای الکترونیکی جدید جهت جبران و ایجاد تطابق در شرایط متغیر استفاده می‌گردد.

۱۳-۶- سایر روشهای اجتناب از کنترل فشار تخلیه

با وجود آنکه علت عمده نیاز به کنترل فشار تخلیه در تأسیسات تبرید فراهم آوردن امکان استفاده کارا از TEVها است، ولی در عین حال علل دیگری نیز وجود دارد که باید مورد بررسی قرار گیرند. یکی از موارد مربوطه وجود افت فشار زیاد بین منبع ذخیره مایع مبرد و اواپراتور است. این امر اغلب زمانی ایجاد می‌شود که اواپراتورها در سطوح بالاتری نسبت

به منبع ذخیره مایع مبرد قرار گرفته‌اند و در نتیجه فشار استاتیکی قابل توجهی را باید جبران نمود. به منظور تأمین تغذیه کافی مایع مبرد در اوقات زمستانی، باید فشار مورد نیاز منبع ذخیره مایع مبرد با استفاده از HPC ایجاد شود. این امر سبب اتلاف انرژی بسیاری می‌شود در حالیکه می‌توان با استفاده از یک پمپ تقویت برقی در مسیر مایع خروجی از منبع ذخیره مایع مبرد، از بروز این مسأله جلوگیری نمود.

در برخی طرحها با استفاده از مبردهای پرفشار، مایع مبرد جمع شده در مخازن مسیر مکش را به سوی منبع ذخیره مایع مبرد خروجی از کندانسور هدایت می‌کنند و با استفاده از HPC اطمینان حاصل می‌گردد که این فرآیند به خوبی انجام می‌گیرد. باز هم یک راه حل بهتر، استفاده از یک پمپ برقی جهت هدایت و عبور دادن مایع مبرد از بخش فشار پایین سیستم به بخش فشار بالای آن است. استفاده از HPC همچنین جهت بهبود کیفیت برفک‌زدایی توسط گاز داغ امری متداول است. لیکن در صورتی که سیستم برفک‌زدایی به گونه صحیحی انتخاب شده باشد، انجام این امر ضروری نخواهد بود (به بخش ۱۴ مراجعه گردد).

۱۴- سیستم‌های برفک‌زدایی

در بسیاری از سیستم‌های سرمایش هوا، در اثر مشکلات ناشی از تشکیل برفک اوپراتورها آسیب می‌بینند. رطوبت موجود در هوا روی لوله‌ها و پره‌های اوپراتور یخ می‌زند و در نتیجه تشکیل برفک، ضریب انتقال حرارت کاهش یافته و اثرات زیان‌بخش بر کارایی سیستم تبرید ظاهر می‌گردد. میزان انتقال حرارت به دو دلیل کاسته می‌شود:

- لایه برفک همانند عایق هر یک از پره‌ها را در برمی‌گیرد.
- با افزایش ضخامت لایه برفک، سرعت هوا کاهش می‌یابد.

کاهش سرعت هوا جدی‌ترین اثر را بر کارایی دارد. معمولاً برفک همچون پلی، فاصله هوایی میان پره‌ها را پر کرده و در نتیجه سبب کاهش و یا قطع کامل جریان هوا از میان پره‌های اواپراتور می‌شود. مشکلاتی از این دست، در کلیه سردخانه‌های دما پایین و یخ‌سازی دمشی وجود دارد. این مسأله همچنین در سردخانه‌هایی که دمای آنها کمتر از 8°C می‌باشد نیز رخ می‌دهد.

با تشکیل برفک و کاهش نرخ انتقال حرارت، توانایی سرمازدایی کویل‌های اواپراتور کاهش می‌یابد. برای جبران این کمبود ناچاراً دمای تبخیر مبرد افت می‌کند که این خود دو اثر زیان بخش دارد:

- ظرفیت سیستم به دلیل کاهش میزان جرمی مبرد پمپ شده توسط کمپرسور پایین می‌آید.
- بازدهی طرح به دلیل افزایش میزان اختلاف دمای مبرد در طول سیکل تبرید، افت می‌کند.

واضح است که باید برفک را در دوره‌های زمانی منظم از روی اواپراتور پاکسازی کرد و این امر با قطع تغذیه ماده مبرد و ذوب کردن برفک تشکیل شده روی کویل انجام می‌شود. شیوه‌های متعددی برای برفک‌زدایی وجود دارد. متداول‌ترین آنها عبارتند از روش برقی (با کمک سیم پیچ‌هایی که در کویل تبخیر تعبیه می‌شوند)، شیوه استفاده از گاز داغ (گاز داغ خروجی از کمپرسور از داخل اواپراتور عبور داده شود)، با استفاده از آب (با عبور آب گرم از روی یخ و برفک) و به کمک هوا (در اتاق‌هایی که دمای آنها بیش از 5°C است، امکان استفاده از هوای خنک جهت ذوب یخ وجود دارد). برفک‌زدایی معمولاً در یک ساعت مشخص آغاز می‌شود (به عنوان مثال یک بار در روز) و پس از دوره زمانی معین و از پیش تعیین شده‌ای به پایان می‌رسد.

۱۴-۱- فرصت‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی

برفک‌زدایی فرآیندی هزینه‌بر است. در صورتی که برفک‌زدایی به قدر کافی صورت نگیرد بازدهی سیستم تبرید به نحو قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند. در صورتی که برفک‌زدایی بیش از حد ضرورت و یا به صورتی غیرکارآ انجام شود، مقدار زیادی انرژی به هدر خواهد رفت. چندین روش برای بهبود طراحی و نحوه کار با سیستم وجود دارد که می‌تواند به صرفه‌جویی در انرژی کمک کند. در کنار سایر جنبه‌های تبرید لازم است به شرایط ویژه نصب و راه‌اندازی سیستم نیز توجه کافی مبذول گردد. اولین پرسشی که باید مطرح شود این است که آیا می‌شود زمینه‌های تشکیل برفک در سیستم را به طور کلی از بین برد و یا حداقل از مقدار آن کاست یا خیر. در صورتی که میزان برفک تشکیل شده کم باشد، تأثیری جدی بر هزینه‌های کارکرد نخواهد داشت. پس از آنکه از کاهش میزان برفک‌زدایی سیستم تا حد ممکن اطمینان حاصل گردید، آنگاه نوبت به اتخاذ تدابیر طراحی مناسب برای تعدیل اثرات برفک، بر کارایی سیستم می‌رسد. در نهایت باید به بازدهی شیوه‌های به کار رفته برفک‌زدایی و روش‌های کنترل مورد استفاده توجه نمود.

۱۴-۲- کاهش میزان برفک‌گذاری سیستم

اصولی‌ترین راه کاهش هزینه‌های مربوط به برفک، پیش‌گیری از شکل‌گیری برفک و یا کاهش امکان تشکیل آن می‌باشد. دو راه جهت انجام این کار وجود دارد:

- جلوگیری از ورود بخار آب به محل تحت سرمایش؛
- جلوگیری از استفاده قسمتی از سطح اواپراتور که به علت سرمای بیش

از حد، آمادگی تشکیل برفک را دارد. (مثال ۱۴ را مشاهده کنید). اغلب مقادیر زیادی بخار آب غیر ضروری در ناحیه تحت تبرید یافت می‌شود. در مورد استفاده از اتاقکهای سرد و سردخانه‌ها رایج‌ترین منبع آب و رطوبت، هوای گرمی است که از طریق درهای باز وارد می‌شود. کنترل منظم و مناسب درها به ویژه در روزهای گرم و مرطوب بسیار اساسی است. گستره‌ای از فن‌آوری‌های نو جهت کاهش میزان عبور هوا از درها و نظم بخشیدن به نحوه باز و بسته کردن آنها وجود دارد. این فن‌آوری‌ها عبارتند از استفاده از پرده‌های نواری پلاستیکی، درهایی که سریعاً باز و بسته می‌شوند و درهایی که به زنگهای هشدار دهنده و کنترل‌کننده‌های مختلف مانند سیستم حلقه القایی مجهزند. در برخی از تأسیسات تولید و نگهداری مواد غذایی، محصولات بخارزا را مستقیماً درون اتاق‌های سرد و در معرض سردکننده‌ها قرار می‌دهند که این مسأله می‌تواند یکی از منابع اصلی پخش بخار آب در محیط‌های سرد باشد. در هر حالتی کلیه منابع ممکن ورود آب باید تعیین و به حداقل رسانده شود. به طور کلی بخار آبی که از طریق محصولات غذایی پراکنده می‌شود و یا رطوبتی که از طریق درزها و روزنه‌ها (از قبیل مدخل ورودی تونل‌ها یا درها) وارد می‌شود، منابع اصلی پخش رطوبت هستند.

از دیگر شیوه‌های به حداقل رساندن تشکیل برفک، احتراز از سطوح بسیار سرد است. این امر تنها در مکانهایی که دما بیش از حدود 5°C است، انجام پذیر است. با طراحی اواپراتورهای بزرگ که دارای سطح زیادی می‌باشند، می‌توان دمای تبخیر را بالاتر از 0°C نگاه داشت که این امر موجب حذف و یا به حداقل رسیدن امکان تشکیل یخ می‌شود. یافتن اندازه بهینه برای مبدل‌های حرارتی در بخش (۱۲) توضیح داده شده است. ممکن است انتخاب یک اواپراتور با اندازه و ابعاد بزرگتری به جلوگیری از تشکیل

برفک کمک زیادی بنماید.

مثال ۱۴ - حذف تشکیل برفک

یک اتاق سرد با هوایی که تحت دمای 6°C نگهداری می‌شود از یک سیستم برفک‌زدایی برقی استفاده می‌کرد. این اتاق دارای ۳ اواپراتور مجهز به برفک‌ذوب کن‌های ۲ کیلو وات بود. به سبب شرایط خاص فرآیند، تشکیل برفک کاملاً سریع صورت می‌گرفت و هزینه سالانه‌ای که از این طریق به هدر می‌رفت به ۱۰۰۰ پوند می‌رسید. دمای تبخیر 2°C بود. قرار شد اتاق جدیدی که دارای اواپراتورهایی با اندازه‌های بزرگتر نسبت به قبل بود ساخته شود به طوری که دمای تبخیر به 1°C می‌رسید. اواپراتورهای جدید ۳۰٪ گران‌تر از اواپراتورهای قبلی بوده ولی در عوض نیازی به تجهیزات برفک‌زدایی برقی نداشتند. با احتساب هزینه گرمکن‌های برفک‌زدا و سیم‌کشی مورد نیاز، قیمت اواپراتور بزرگتر چندان زیاد به نظر نمی‌رسید، به علاوه در این طرح برای موارد اضطراری سیستم برفک‌زدایی هوایی نیز موجود بود.

۱۴-۳- طراحی کویل تبخیر به منظور کاهش تشکیل برفک

در یک طرح جدید، با طراحی مطلوب کویل می‌توان آثار ناشی از

تشکیل برفک روی اواپراتور را کاهش داد. یک تمهید اساسی آن است که از کم شدن فاصله هوای بین پره‌های اواپراتور جلوگیری شود. در صورتی که تعداد پره‌ها بیش از ۴ پره در اینچ باشند، برفک به سرعت فاصله هوایی بین دو پره مجاور را پر می‌کند. فاصله‌های هوایی بزرگ‌تر نیز به افزایش هزینه کویل می‌انجامد، ولی از بسیاری جهات این شیوه هنوز هم اقتصادی‌تر است. همچنین ممکن است در مقطع ورودی، فاصله بین پره‌ها را بیشتر و کمی جلوتر، این فاصله را کمتر در نظر گرفت.

۱۴-۴- انتخاب سیستم برفک‌زدایی

به کار بستن موارد توضیح داده شده در بخش‌های ۱۴-۲ و ۱۴-۳ تلفات بازدهی ناشی از تشکیل برفک را کاهش می‌دهد. البته در بیشتر مواقع و بخصوص زمانی که هوا تا زیر 3°C خنک می‌شود، جلوگیری از تشکیل برفک غیر ممکن است و استفاده از یک سیستم برفک‌زدایی مناسب ضروری خواهد بود.

یک تصمیم اساسی که باید از سوی طراح اتخاذ گردد، انتخاب شیوه برفک‌زدایی است. روش‌های پایه‌ای در این زمینه عبارتند از:

- گرم کردن داخل کویل تبخیر (با عبور یک سیال داغ از درون مدار تبرید)؛
- گرم کردن خارجی کویل تبخیر
- برفک‌زدایی برقی

بهترین انتخاب به تعدادی از عوامل وابسته است که تابع نوع و ویژگی‌های هر کاربرد بخصوص است. به طور کلی انتخاب‌های متنوع‌تری در مورد یک سیستم سرماسازی بالاتر از 0°C ، نسبت به یک طرح تبرید زیر صفر وجود دارد. طرح‌های دما پایین را تنها می‌توان با استفاده از

روش‌های گرم کردن خارجی برفک زدایی نمود. برفک زدایی برقی گرانترین روش برفک‌زدایی است و حتی‌المقدور باید از آن اجتناب نمود. برفک‌زدایی به کمک گاز داغ، اصلی‌ترین روش گرم کردن داخلی است. در این روش، گاز داغ ورودی به کندانسور به سمت اواپراتوری هدایت شده و کویل تبخیر را گرم می‌کند. این شیوه یک روش متداول و تا حد قابل قبولی مؤثر است، هر چند در شیرهایی که پس فشار^{۲۸} آنها درست تنظیم نشده است، انرژی تلف می‌شود. روش گرم کردن خارجی را زمانی باید به کار برد که استفاده از آن آسانتر است. کم هزینه‌ترین شیوه برفک‌زدایی خارجی، استفاده از جریان هوای طبیعی در اطراف کویل تبخیر سردخانه‌ها است. این امر مستلزم مصرف هیچ گونه انرژی اضافی نیست. البته این روش فقط زمانی مؤثر است که دمای اتاق بیش از حدود 4°C باشد و در نتیجه این روش جهت زدودن برفک‌ها به زمان زیادتری نیاز دارد. در اتاقهایی که دمای آنها در حدود 5°C بوده و با هوا برفک‌زدایی می‌شوند، همواره بهتر است اندازه کویل را بزرگ‌تر از حد معمول در نظر گرفت. یکی دیگر از شیوه‌های گرم کردن خارجی استفاده از پاشش آب گرم بر روی کویل است. این شیوه به ویژه زمانی کارآمدتر است که از حرارت تلف شده (یعنی حرارت دفع شده از کندانسور) جهت گرم کردن مجدد آب حاصل از ذوب برفک‌ها و پاشش مجدد آن استفاده شود. در واقع باید از یک بار استفاده از آب اجتناب شود، زیرا این امر موجب هدر رفتن آب و تحمیل هزینه‌های اضافی برای هدایت آن به خارج خواهد شد. همچنین باید به دقت از بازگشت بخار آب به درون اتاق سرد و یا پخش ذرات آن در هوا جلوگیری شود. نمونه‌ای دیگر از روش‌های برفک‌زدایی با آب، استفاده از سردکن‌های

«بدون برفک» است. در این نوع سردکن‌ها، جریان پاششی از محلول گلیکول به طور پیوسته از روی لوله‌های کویل عبور داده می‌شود، در نتیجه بخار آب موجود در هوا توسط جریان گلیکول از محیط خارج شده و برفک تشکیل نمی‌شود. آبی که دائماً به مدار گلیکول اضافه می‌شود بایستی به هنگام تغلیظ مجدد گلیکول با استفاده از یک شیوه گرمایشی دفع شود.

۱۴-۵- برفک‌زدایی به هنگام نیاز

یکی از مهم‌ترین راه‌های کاهش هزینه برفک‌زدایی، بهینه‌سازی زمان و دوره برفک‌زدایی است. در بسیاری از موارد، برفک‌زدایی در دفعات زیاد و بیش از حد صورت می‌گیرد. این بدان سبب است که فاصله میان زمان‌های برفک‌زدایی معمولاً برای بدترین شرایط احتمالی تنظیم می‌شود (یعنی یک روز مرطوب تابستانی) و در کل طول سال برفک‌زدایی طی همین زمان‌ها تکرار می‌شود. اما در فصول دیگر نرخ تشکیل برفک کندتر بوده و در نتیجه فواصل زمانی تنظیم شده نیز کوتاه‌تر از حد مورد نیاز خواهد بود. با استفاده از یک سیستم برفک‌زدایی که تنها در مواقع نیاز وارد عمل می‌شود، می‌توان از این امر جلوگیری کرد.

در این روش با استفاده از یک حساسه، تشکیل یخ رؤیت شده و زمانی که ضخامت آن به حد معینی می‌رسد، سیکل برفک‌زدایی آغاز می‌شود. حساسه‌های رؤیت‌کننده یخ در انواع متنوعی در دسترس می‌باشند که بر اساس روش‌های نوری، و یا با اندازه‌گیری سرعت و یا درجه حرارت هوای عبوری و یا اختلاف فشار عمل می‌کنند (مثال ۱۵ را مشاهده کنید)

مثال ۱۵- استفاده از برفک‌زدایی به هنگام نیاز

سیستم برفک‌زدایی یک اتاقک یخ‌ساز چنان تنظیم شده بود که دوبار در روز برای هر یک از ۶ مجموعه کویل‌های سرد کننده فعال می‌گردید و کل هزینه برفک‌زدایی به ۲۰۰۰ پوند در سال بالغ می‌گردید. یک سیستم برفک‌زدایی جدید که تنها به هنگام نیاز فعال می‌گردید بر روی آن نصب گردید که با استفاده از حساسه‌های جدید در زمستان‌ها فاصله‌های بین زمان‌های برفک‌زدایی به دو روز در هفته رسید و از این رو صرفه‌جویی زیادی معادل ۱۵۰۰ پوند در سال به ازای سرمایه‌گذاری اولیه ۳۰۰۰ پوند حاصل گردید.

۱۴-۶- کنترل سیکل برفک‌زدایی

زمانی که یک سیکل برفک‌زدایی آغاز می‌شود تعدادی فرآیندهای مجزا باید صورت بگیرند. ابتدا تغذیه مبرد متوقف شده و کویل‌های سرد کننده از مبرد تخلیه می‌شوند (یعنی مایع مبرد درون آنها می‌جوشد و به سوی کمپرسور خارج می‌شود). پس از آن لوله مکش بسته می‌شود (یا کمپرسور خاموش می‌شود) و دمنده‌ها نیز خاموش می‌گردند (به جز در مواردی که از هوا جهت برفک‌زدایی استفاده می‌شود). سپس به کمک یکی از شیوه‌های برفک‌زدایی، برفک و یخ تشکیل شده روی کویل‌های سرد کننده ذوب می‌شود. زمانی که این فرآیند تکمیل شده، تأخیری جهت خروج آب از روی کویل‌های سرد به سوی فاضلاب صورت می‌گیرد، که این تأخیر پیش از روشن شدن مجدد دمنده‌ها و باز شدن خطوط مایع و مکش انجام می‌شود. برای به حداقل رساندن مصرف انرژی، این فرآیندها باید به دقت بهینه

شوند. در سیستم‌های انبساط مستقیم کوچک، اطمینان از عدم ایجاد شرایط خلاء به هنگام تخلیه کویل سرد، از اهمیت زیادی برخوردار است، چرا که این امر ممکن است به نفوذ هوا به درون مدار مبرد منجر شود. طول زمان برفک‌زدایی باید به کمک یک ساعت و یا با استفاده از حساسه‌ای که تکمیل کار برفک‌زدایی را تعیین می‌کند، تنظیم شود. ایجاد تأخیر زمانی کافی برای جمع آوری و هدایت آب حاصل از ذوب برفک‌ها به سوی فاضلاب به منظور جلوگیری از یخ زدن مجدد آن حائز اهمیت است.

۱۴-۷- برفک‌زدایی به کمک گاز داغ

سیستم‌های برفک‌زدایی به کمک گاز داغ در برخی موارد سبب بروز تلفات بسیاری می‌شوند. در این روش، کویل‌های سرد، با تغذیه گاز داغ خروجی از کمپرسور، از درون گرم می‌شوند. گاز داغ پس از عبور از درون کویل سرد، پس از عبور از یک شیر وارد خط مکش کمپرسور می‌شود. در صورتی که این شیر به صورت صحیحی تنظیم نشده باشد یا برفک‌زدایی مدت زیادی طول بکشد، گاز داغ می‌تواند از لوله مکش عبور کرده به کمپرسور وارد شود، که این امر سبب بروز تلفات می‌گردد. در برخی طرحها طی زمانی که برفک‌زدایی توسط گاز داغ صورت می‌گیرد، فشار کندانسور در سطح نسبتاً بالاتری نگاه داشته می‌شود. این امر به ویژه در فصل زمستان از کارآیی طرح از دیدگاه انرژی به شدت می‌کاهد.

۱۵- خلاصه بخش چهارم: طراحی اجزاء

- شاید کمپرسورها مهم‌ترین اجزاء یک سیستم تبرید باشند که تأثیر عمده‌ای بر بازدهی و هزینه‌های اولیه سیستم دارند.
- تحت کلیه شرایط کاری، انتخاب ترکیب درست و اندازه مناسب برای

- کمپرسورها به طوری که ناچار به کار تحت شرایط بار جزئی نباشد، بسیار مهم است. برای حصول این امر لازم است که کلیه شرایط کارکردی کمپرسورها مورد بررسی و تحلیل قرار گیرند.
- اندازه اواپراتورها و کندانسورها بر بازدهی تأثیر می‌گذارد. اندازه‌های بهینه باید با توجه به شرایط کار، میزان ساعت کار و قیمت برق مصرفی محاسبه شود.
 - انتخاب و عملکرد شیر انبساط تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کارایی کلی و هزینه کارکرد تأسیسات تبرید دارد.
 - کنترل فشار تخلیه کمپرسور سبب اتلاف بسیاری می‌شود و تا حد امکان باید از آن اجتناب کرد.
 - برفک‌زدایی فرآیند هزینه‌بر است و در صورتی که به درستی صورت نگیرد بازده سیستم را به نحو بسیار شدیدی کم می‌کند.

بخش پنجم: طراحی با هدف ایجاد سهولت در عملیات تعمیر و نگهداری

در بخش‌های پیشین این کتاب راهنما فرصت‌های مغتنمی برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها بر مبنای طراحی دقیق فرآیندها، سیستم تبرید و اجزای آن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نقش یک طراحی هوشمندانه در به حداقل رساندن هزینه‌های راهبری و تعمیر و نگهداری سیستم نیز مسأله‌ای بسیار حائز اهمیت است. کتاب راهنمای جداگانه‌ای (شماره ۴۲) با عنوان «طرح تبرید صنعتی: راهبری و نگهداری با هدف بهره‌وری از انرژی» این موضوع را مورد بررسی قرار می‌دهد.

۱۶- اندازه‌گیری و ابزار دقیق

بسیاری از طرح‌های تبریدی که در گذشته به کار گرفته شده‌اند دارای حداقلی از ابزارهای دقیق مورد نیاز هستند. اما تنها زمانی می‌توان به بازدهی و کارایی مناسب در راهبری و نگهداری سیستم دست یافت که ابزارهای اندازه‌گیری و هشدار دهنده به اندازه کافی در سیستم نصب شده باشند. ابزارهای دقیق را به طور کلی به دو دسته می‌توان تقسیم نمود:

- انواع کامل:^{۲۹} از قبیل کنتور برق، گرماسنجها و زمان سنجها. این نوع ابزارها می‌توانند جهت نظارت و یا تأثیرگذاری بر سیستم و به منظور افزایش بازدهی مورد استفاده قرار گیرند.

- انواع غیر کامل (جزئی): از قبیل حساسه‌های فشار و دما و دبی‌سنجها که می‌توان از آنها جهت تشخیص عیوب سیستم استفاده نمود. در سیستم‌هایی که دارای کمپرسورهای ۵ کیلوواتی و یا بیشتر هستند، لازم است که در مرحله طراحی به نیازهای ابزار دقیق سیستم برای مراحل راه‌اندازی و آزمونهای تأیید طرح توجه داشت. همچنانکه لازم است مجموعه‌ای از ابزارهای دقیق دائمی را جهت مراحل راهبری، عیب‌یابی و تعمیر و نگهداری در نظر گرفت. به عنوان حداقل موارد لازم می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- فشارسنج لوله مکش کمپرسور؛
- فشار سنج لوله دهش کمپرسور؛
- شیشه رؤیت^{۳۰} نشان دهنده مایع مبرد در سیستم‌های نوع dx.
- در سیستم های بزرگ‌تر (با توان بیش از ۵۰ کیلووات) باید ابزار دقیق بیشتری را جهت اندازه‌گیری متغیرهای ذیل در نظر گرفت:
- جریان کمپرسور؛
- دمای واقعی گاز خروجی از کمپرسور؛
- دمای واقعی گاز مکش؛
- دمای هوای مرطوب و خشک محیط؛
- دمای سیال سرد شده در مقاطع ورودی و خروجی (مانند هوا، آب، گلیکول و غیره)؛

²⁹ - Integrating type

³⁰ - Sight galass

- میزان مصرف انرژی برق (در کمپرسور و تجهیزات فرعی).
بهتر است که سیستم‌های ابزار دقیق بزرگتر مثل سیستم‌های نظارت همزمان و کامل تأسیسات در مورد طرح‌های بزرگ صنعتی به کار گرفته شود. همچنین باید جهت تسهیل در استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری و ابزار دقیق قابل حمل، نسبت به تأمین محل برای دماسنج‌ها^{۳۱}، محل‌های قرار دادن حساسه‌ها و تأمین محل نصب دبی‌سنج‌های میله‌ای و سایر موارد، تدابیر لازم در نظر گرفته شود. این امر می‌تواند به عملیات عیب‌یابی سیستم در آینده کمک قابل توجهی بنماید.
هر گونه ابزار دقیق دائمی نصب شده روی سیستم را باید بتوان به آسانی از محل خود بیرون آورد تا در زمان لازم نسبت به تنظیم نمودن مجدد آن اقدام شود. این امر نیازمند استفاده از شیرهای جداکننده است. برای تأسیساتی که هزینه کاربری زیادی دارند، استفاده از سیستم‌های نظارت، هدایت و رفع عیب هوشمند، توصیه می‌گردد.

۱۷- طراحی تأسیسات

- در مرحله طراحی باید جهت حصول اطمینان از رعایت موارد زیر دقت کافی را مبذول داشت:
- خط آسیب‌های فیزیکی به تأسیسات به حداقل برسد. به عنوان مثال تأسیسات، لوله‌کشی مبدل‌های حرارتی و امثال آن، باید از دسترس افراد، وسائط نقلیه و غیره دور باشند.
 - جهت انجام خدمات تعمیر و نگهداری باید کلیه تجهیزات به آسانی قابل دسترسی باشند. مثلاً باید فضای کافی جهت برداشتن در پوش‌های

³¹ - Temperature pockets

مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله‌ای به منظور تمیز کاری لوله‌ها در نظر گرفته شود.

• خطر قطع ارتباط با هوای آزاد در مورد مبدل‌های حرارتی که با هوا خنک می‌شوند، کندانسورهای تبخیری یا برج‌های خنک‌کن به حداقل ممکن برسد. به عنوان مثال کندانسورهایی که با هوا خنک می‌شوند نباید در محل‌های بسته و محدود قرار گیرند.

• خطر رسوب گرفتن کندانسور با قرار دادن آنها در محل مناسب به حداقل ممکن برسد.

• خطر کثیف کردن اواپراتورها به حداقل ممکن برسد. به عنوان مثال می‌توان با افزایش دمای تبخیر و یا فاصله هوایی میان پره‌ها از تشکیل برفک جلوگیری نموده و یا حداقل از میزان آن کاست. می‌توان از روغن گرفتن مجاری اواپراتور با استفاده از سیستم‌های روغن‌گیر جلوگیری نمود، مثلاً با استفاده از جداکننده‌های روغن، مجاری تخلیه و غیره.

پیوست ۱- منابع اطلاعاتی

- در این کتاب راهنما به برخی از متون استاندارد به عنوان مرجع اشاره شده است. برخی از بهترین آنها که در دسترس هستند، عبارتند از:
- **ASHRAE Guides, Volumes 1 to 4, covering all aspects of refrigeration available from the American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning Engineers Inc., 1791, Tullie Circle, N.E., Atlanta, G.A. 30329.**
 - **Dossat, R.J. Principles of Refrigeration, of Refrigeration, a text on refrigeration published by John Wiley and Sons.**
 - سایر مجموعه‌های **Good Practice Guides** و دروس مطالعاتی که توسط **ETSU** یا سازمان بهره‌وری انرژی ایران ارائه شده است.

پیوست ۲- محاسبه نمودار تغییرات دما و بار سرمایی

نمودارهای بار سرمایی

نمودار بارهای سرمایی، در واقع نمودار چگونگی تغییرات بار سرمایی مورد نیاز بر حسب زمان است و با استفاده از آن می‌توان نسبت به تعیین اندازه کمپرسورها، تعیین روش‌های بهینه و کنترل و بررسی فرصت‌های ممکن برای ذخیره حرارت اقدام نمود.

دوره زمانی تحت بررسی (به عنوان مثال یک روز کامل) را باید به دوره‌های زمانی کوچکتری (مثلاً برابر نیم ساعت) تقسیم نمود. آنگاه باید هر یک از بارهایی (یا جریان‌هایی) که در طول روز به سیستم اعمال می‌شود را به دقت مورد مطالعه قرار داد و برای هر یک از فواصل زمانی مذکور میزان

و نوع بار اعمال شده را تعیین نمود.
پس از تکمیل موارد فوق برای کلیه جریانها، باید تمامی بارهای واقع شده در هر فاصله زمانی را جمع و نتیجه را در یک نمودار ترسیم کرد (شکل ۴ را ببیند).

نمودارهای دما

نمودارهای توزیع دما نسبتاً پیچیده تر هستند. این نمودارها نشان دهنده میزان نیازهای سرمایی در سطوح مختلف درجه حرارت بوده (شکل ۵ را مشاهده کنید) و وجود آنها می تواند به درک منافع احتمالی استفاده از سیستم تبریدی که درجه حرارت سرمایی آن یکسان یا چندگانه است کمک کند. کلیه جریان‌ها (بارهای سرمایی) را باید مورد آزمون قرار داد و محدوده‌های دمای سرمایی مورد نیاز برای هر یک را تعیین نمود. سپس کل محدوده دمایی را باید به فواصل یک درجه‌ای تقسیم نمود. به ازای هریک از فواصل (مثلاً بین 10°C تا 9°C) باید تعیین نمود که آیا هیچ یک از جریان‌های موجود، نیاز به سرمایش در این درجه حرارت دارند یا خیر و در صورت مثبت بودن پاسخ باید میزان سرمای مورد نیاز در این محدوده را محاسبه نمود. به عنوان مثال جریان آبی که نیازمند سرد شدن از 20°C تا 5°C است، لازم است که در محدوده 10°C تا 9°C نیز سرد شود و توان مورد نیاز برای این کار برابر $4/2$ کیلووات خواهد بود (با فرض جریانی معادل 1kg/s و با استفاده از معادله (۱) می توان این مقدار را تعیین نمود). همچنین باید کل سرمایش مورد نیاز در طول یک دوره زمانی مناسب (روز، هفته، سال) را معین نمود. مثلاً اگر آب سرد در طول زمانی معادل ۱۰۰ ساعت در هفته مورد نیاز باشد، آنگاه کل بار سرمایی مورد نیاز در محدوده 10°C تا 9°C معادل ۴۲۰ کیلووات ساعت خواهد بود.

پس از تکمیل اطلاعات لازم به ازای هر جریان، می باید با اضافه کردن کلیه بارها و کل نیاز سرمایش (کیلووات یا کیلووات ساعت) برای هر بازه زمانی، نمودار مربوطه را ترسیم نمود.

نمودار تغییرات $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ بر حسب دما، اندازه تأسیسات مورد نیاز جهت تأمین بار سرمایی در سطوح مختلف درجه حرارت را نشان می دهد

(اندازه به سطوح زیر منحنی بستگی دارد). از سوی دیگر، نمودار تغییرات $kWh/^\circ C$ برحسب دما، کل انرژی سرمایه مورد نیاز در سطوح مختلف درجه حرارت را نشان می‌دهد (میزان مصرف انرژی با سطح زیر منحنی متناسب است).

پیوست ۳- محاسبه بازده راندمان کمپرسور جهت محاسبه راندمان یک کمپرسور با توجه به اطلاعات سازنده لازم است یک سیکل ترمودینامیکی بر اساس اطلاعات یک مبرد خاص، مدل سازی شود. در شکل (۸) شمای کلی یک سیکل تک مرحله‌ای همواره با نمودار مولیر^{۳۲} مربوطه نشان داده شده است.

بازده کمپرسور به این صورت تعریف می‌شود:

$$\eta_{isen} = \text{کار تراکمی واقعی} / \text{کار تراکمی ایده‌آل}$$

با توجه به شکل (۸) این مقدار معادل است با:

$$\eta_{isen} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

که در آن h انتالپی مبرد است. با استفاده از مثال کمپرسور A که در

بخش

۲-۱۱ این کتاب به آن اشاره شد، اطلاعات زیر در دست است:

مبرد

بار سرمایی

۱۰۰

کیلووات

توان

۳۰

کیلو وات

دمای تبخیر

°C

-۱۰

دمای تقطیر

°C

۳۵

فوق گرمایش گاز در مکش

°C

۱۰

فوق سرمایش مایع در خروجی کندانسور

°C

۱۵

برای تعیین بازده عملیات زیر انجام می شود:

۱- شرایط انتالپی و انترپی مبرد R۲۲ در نقطه مکش کمپرسور، تحت

دمای اشباع 10°C - (معادل فشار نسبی بر حسب bar) با فوق گرمایش 10°C از جداول بخار فوق گرم خوانده می‌شود.

$$h_1 = 308/9 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_1 = 1/792 \text{ KJ/Kg}^{\circ}\text{K}$$

۲- برای دمای اشباع 35°C ، نقطه 2s با جستجوی نقطه‌ای با شرایط ذیل تعیین می‌گردد:

$$s_{2s} = s_1$$

$$h_{2s} = 343/3 \text{ kJ/kg} \quad \text{در نتیجه}$$

۳- انتالپی در نقطه ۳ از جداول اشباع مایع در 25°C (فوق سرمایش مایع $10^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C}$)، بدست خواهد آمد.

$$h_3 = 129/8 \text{ kJ/kg}$$

۴- از آنجا که شیر انبساط تغییری در میزان مصرف انرژی ایجاد نمی‌کند:

$$h_4 = h_3 = 129/8 \text{ kJ/kg}$$

۵- بار سرمایی، q به ازای هر کیلوگرم مبرد عبارت است از:

$$\begin{aligned} q &= h_1 - h_4 \\ &= 308/9 - 129/8 \\ &= 179/1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

۶- بار واقعی سرمایی Q عبارت است از:

$$Q = qm$$

(که در اینجا m نرخ جریان جرم مبرد بر حسب kg/s است).

$$m = Q/q \quad \text{در نتیجه}$$

$$= 100:179/1$$

$$=0.558 \text{ kg/s}$$

۷- توان واقعی کمپرسور، P عبارت است از:

$$P = (h_2 - h_1)m$$
$$h_2 - h_1 = P/m$$

که در نتیجه:

$$=30.0/56$$

$$=53/73 \text{ kJ/kg h}$$

۸- اکنون بازده کمپرسور را به صورت زیر می توان بدست آورد:

$$\eta_{isen} = \frac{h_2s - h_1}{h_2 - h_1} \times 100$$

$$= [(343/3 - 308/9) / 53/73] \times 100$$

$$=64\%$$

پیوست ۴- فهرست علائم و واحدها

kW	حرارت جذب شده در اوپراتور	Q_e
kW	حرارت دفع شده در کندانسور	Q_c
kW	توان مصرف شده توسط کمپرسور	P
°C	دما در نقطه x	T_x
—	ظرفیت عملکرد	COP
—	ضریب عملکرد سیستم	SYSTEM COP
Kw	بار سرمایی	Q
°C	دمای اولیه	T_i
°C	دمای نهایی	T_f
Kg/s	نرخ جریان جرمی	m
KJ/kg°C	ظرفیت گرمای ویژه	c_p
KJ/kg	گرمای نهان ویژه	L
Kg/mol	جرم مولکولی نسبی	M
KJ/mol	انتالپی واکنش	H
kW/m²°C	ضریب انتقال حرارت	U
m²	مساحت سطح	A
kW/m°C	ضریب هدایت حرارتی	K
m	ضخامت	L
KJ/kg	انتالپی مخصوص در نقطه x	h_x
	بازده آنتروپی ثابت	n_{isen}