سال ۲۸، شماره ۱۲۷، صفحات ۴۲–۴۷، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

مطالعه کاربردی مزایا و محدودیت‌های چیلرهای تراکمی و جذبی به همراه ارائه مدل

محمدمهدی امیری

استادیار، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

amirimm@ripi.ir

◄ چکیده

چیلرها از مهم‌ترین تجهیزات تولید برودت در ساختمان‌های بزرگ محسوب می‌شوند و شناخت صحیح از این ماشین‌ها، عامل اساسی در انتخاب تجهیزات و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان هستند. به طور کلی چیلر دستگاهی است که حرارت را از سیال می‌گیرد. به طور معمول از این سیال برای خنک‌کاری هوا یا دستگاه‌ها استفاده می‌شود. خنک‌سازی هوای ورودی به ساختمان با چند روش مختلف امکان پذیر است، که در این تحقیق این دو روش به نام چیلر تراکمی و چیلر جذبی معرفی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا بتوان فهمید که کدام یک از این روش‌ها بازدهی بهتری دارند. با توجه به داده‌های بدست‌آمده معلوم شد که چیلر تراکمی در دمای ۴۵ درجه توان خالص خروجی را نسبت به حالت بدون خنک سازی ٪۶/۷ بهبود بخشید و چیلر جذبی در دمای ۴۵ درجه توان خالص خروجی را نسبت به حالت بدون خنک‌کاری ٪۱۷/۳ افزایش داد. همچنین در مقایسه‌ای که بین عملکرد چیلر جذبی و چیلر تراکمی در دماهای مختلف ورودی صورت گرفت، چیلر جذبی به مراتب عملکرد بهتری نسبت به چیلر تراکمی داشت. در چیلر جذبی چون مصرف برق کمپرسور وجود ندارد لذا توان خالص تولیدشده توسط توربین بیشتر است.

◄ واژگان کلیدی

چیلر
جذبی
تراکمی
مقایسه فنی
برآورد اقتصادی

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۱۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

۱ مقدمه

چیلر[1] دستگاهی است که حرارت را از مایع (معمولاً آب) بر اساس سیکل تبرید تراکم بخار یا جذبی می‌زداید. از این مایع برای خنک‌کاری هوا و یا خنک‌کاری دستگاه‌ها استفاده شود که معمولاً به صورت سیکل و درون یک مبدل حرارتی جریان دارد. توجه به عوامل گوناگونی که در میزان مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی ساختمان نقش دارند، در ارائه راهکارهای صرفه‌جویی در بخش ساختمان و کاهش مصرف انرژی در بخش خانگی، تأثیر فراوانی می‌گذارد. بررسی‌های صورت گرفته در کشور بیانگر این واقعیت می‌باشد که بخش خانگی با مصرف بیش از ٪۴۰ از کل انرژی مصرفی کشور، بالاترین سهم را در میان سایر بخش‌های اقتصادی به خود اختصاص داده، که از این میان بیشترین میزان مصرف مربوط به گاز طبیعی و بیشترین ارزش انرژی مصرفی مربوط به نفت سفید بوده است [۱]. شرایط اقلیمی و آب و هوایی، معماری ساختمان، مصالح ساختمان، راندمان سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، انتخاب صحیح تجهیزات و همچنین کنترل سیستم‌های تهویه مطبوع از عوامل مؤثر در میزان مصرف انرژی در ساختمان محسوب می‌شوند. بررسی چیلرهای تراکمی و جذبی از دیدگاه انرژی همواره مورد علاقه مهندسین و دست‌اندرکاران صنعت ساختمان بوده است. میلانی و همکاران در تحقیقی که انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که چیلرهای جذبی را تنها در مواقعی باید به کار برد که منابع رایگان انرژی مانند خورشید و زمین گرمایی در دسترس باشد [۲]. نوروزی [۳] روی راندمان چیلرهای جذبی تک اثره کار کرد و تأثیر دماهای اجزای سیکل را بر روی راندمان نشان داد. عابدی و همکاران [۴] به مقایسه فنی و اقتصادی چیلر تراکمی پیچی و جذبی تک‌اثره پرداختند و میزان انرژی مصرفی، فضای موردنیاز و هزینه‌های اولیه و راهبری آنها را مورد مطالعه قرار دادند. دینگک و ایلری [۵] سطح تبخیر کننده و چگالنده و بازده متراکم‌کننده را به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته و با استفاده از آنالیز اگزرژی چرخه را بهینه کردند. موروتاس و همکاران [۶] یک مدل محاسباتی بر اساس اگزرژی برای تعیین افت فشارها و بازده قانون دوم و ضریب عملکرد ارائه کردند که بدون در نظر گرفتن هزینه‌ها و صرفاً از طریق محاسبات ترمودینامیکی بود. سلباس [۷] نیز از روش ضرایب لاگرانژ جهت بهینه‌سازی سیستم‌های حرارتی استفاده کرد. وی در روش خود تابع هزینه را به عنوان تابع هدف انتخاب نمود که نکته مشترک اغلب پژوهش‌های انجام شده است. او دریافت که تحلیل اگزرژی سیستم‌های حرارتی نیز در بهینه‌سازی این سیستم‌ها دارای اهمیت می‌باشد و به کمک اتلاف اگزرژی می‌توان عملکرد سیستم‌های اولیه و بهینه‌شده را مقایسه نمود. هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای پیشرفته دنیا از چیلرهای جذبی استفاده بسیاری می‌گردد. ولی استفاده از این چیلرها عموماً جهت بازیابی حرارت مازاد و پرت نیروگاه‌ها، کوره‌ها و پروژه‌های CCHP تولید سرمایش، گرمایش و برق توأمان) و یا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی زمین گرمایی می‌باشد و کمتر جهت کارکرد این چیلرها از انرژی حاصل از سوختن گاز طبیعی استفاده می‌گردد. از جمله دلایل کاربرد محدود چیلرهای جذبی در

[1] chiller

مواردی غیر از موارد فوق‌الذکر و استفاده از چیلرهای تراکمی بطور گسترده در ساختمان‌های این کشورها، می‌توان به ضریب عملکرد پایین چیلرهای جذبی، ارزش بسیار بالاتر گاز طبیعی در مقایسه با برق و نیز آلایندگی زیست محیطی بیشتر چیلرهای جذبی در مقایسه با چیلرهای تراکمی اشاره کرد. متأسفانه در کشور ما با توجه به قیمت بسیار غیرواقعی گاز نسبت به برق روز به روز استفاده از چیلرهای جذبی با مصرف گاز طبیعی در ساختمان‌ها در حال توسعه است. کاربرد چیلرهای جذبی با استفاده از گاز طبیعی زمانی غیر منطقی‌تر است که این چیلرها در ساختمان‌های اداری و آموزشی به کار روند. بعضاً توجیه می‌شود که استفاده و یا جایگزین کردن چیلرهای جذبی به جای چیلرهای تراکمی در ساختمان‌های اداری و آموزشی کشور، جهت کاهش مصرف برق و پیک‌زدایی از شبکه برق در تابستان می‌باشد.

در این مقاله یک ساختمان مسکونی با بار برودتی ۱۱۱۱ تن تبرید در تهران مورد مطالعه قرار داده شد. چهار نوع چیلر تراکمی سانتریفیوژ دور ثابت و دور متغیر، جذبی شعله مستقیم و پیچی برای تأمین بار برودتی ساختمان در نظر گرفته شد و سیستم سرمایش بر مبنای این ۴ نوع چیلر، طراحی شد. میزان مصارف انرژی هر سیستم، هزینه‌های مصارف انرژی هر سیستم، هزینه خرید و نصب تجهیزات محاسبه شد و مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این ساختمان، امکان طراحی سیستم سرمایشی ساختمان بر اساس تمامی ۴ نوع چیلر برای تأمین بار برودتی امکان‌پذیر بوده است. هدف از انجام این پروژه برآورد دقیق بار برودتی می‌باشد که از دو روش دستی و محاسبات از طریق نرم‌افزار بدست آمده تا با مقایسه جواب‌ها و بارهای محاسبه شده از هر دو طریق بتوان مقدار مناسب و صحیح را انتخاب کرد و با استناد به داده‌های بدست‌آمده، تجهیزات سرمایشی مناسب را به صورت صحیح و کاملاً اقتصادی انتخاب نمود.

۲ بررسی چیلرها

از چیلرها برای تأمین برودت مورد نیاز در پروژه‌های بزرگ به عنوان یک گزینه ارزشمند و اقتصادی به راحتی نمی‌توان چشم پوشید. چیلرهای تراکمی با استفاده از انرژی الکتریکی و چیلرهای جذبی با استفاده از انرژی حرارتی، تولید سرما می‌کنند، لذا بسته به شرایط آب و هوایی، منطقه جغرافیایی، هزینه انرژی مصرفی، هزینه تأمین آب و ... تنها استفاده از برخی از انواع چیلرها وجود خواهد داشت. کاربرد اصلی چیلر جذبی عموماً جهت بازیابی حرارت مازاد و پرت نیروگاه‌ها، کوره‌های القایی و ...، جهت پروژه‌های (CCHP) تولید سرمایش،گرمایش و برق توأمان) و یا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی زمین گرمایی و خورشید بوده و کمتر جهت راه‌اندازی این چیلرها از انرژی حاصل از سوزاندن مستقیم گاز طبیعی استفاده می‌گردد. با توجه به قیمت پایین‌تر گاز نسبت به برق و عدم شناخت صحیح مهندسین از کاربرد اصلی چیلر جذبی، استفاده از چیلرهای گازسوز در کشور توسعه یافته است که این موضوع علاوه بر آلوده‌سازی هوای شهرها، سبب هدرروی و استفاده نامناسب از این انرژی ارزشمند شده است. چیلرهای جذبی دستگاه‌هایی هستند که بر اساس جذب و دفع مبرد (آب) توسط ماده جاذب (لیتیم برماید) به ترتیب در بخش‌های جاذب (ابزوربر) و ژنراتور توانایی ایجاد برودت (تولید آب سرد) در بخش اواپراتور را بر اثر تبخیر مبرد دارند، که البته برای کامل شدن سیکل تبرید نیاز به یک منبع دمایی نسبتاً پایین (آب خنک‌کننده) در بخش کندانسور برای تقطیر مبرد دارند. چیلرهای جذبی برای فرآیند ایجاد سرمایش به یک منبع انرژی گرمایی نیاز دارند که در چیلرهای جذبی شعله مستقیم این منبع انرژی حرارتی از احتراق گاز داخل ژنراتور دستگاه ایجاد می‌گردد. چیلرهای جذبی دواثره از دو ژنراتور، ژنراتور دما بالا و ژنراتور دما پایین برای افزایش بازده بهره می‌برند. چیلر جذبی مورد نظر دارای $\mathrm{Cop} = ۱۱۳$ در ردهٔ بالاترین ضریب عملکرد بین چیلرهای جذبی موجود در بازار ایران با احتساب ارزش حرارتی گاز ایران است. ضریب عملکرد COP[۲] بیانگر راندمان دستگاه‌های سرمایشی و گرمایشی سیکل تبرید مانند چیلر، پکیج روف تاپ، پمپ حرارتی GHP، VRF، اسپلیت کولر گازی و غیره است. ضریب عملکرد COP با نسبت توان حرارتی گرفته‌شده از هوای فضای مورد نظر، آب یا هر سیال دیگری به توان الکتریکی ورودی به دست می‌آید. ضریب عملکرد همان راندمان ماشین‌ها بوده ولی مقدار آن از ٪۱۰۰ بیشتر است و اگر مقدار آن برای دستگاهی کمتر از ٪۱۰۰ باشد آن دستگاه به‌درستی کار نخواهد کرد.

چیلرهای تراکمی یک سیکل ساده تبرید با چهار بخش اصلی کمپرسور،کندانسور، اواپراتور و شیر انبساط است که بر اساس سیکل تبرید کارنو کار می‌کند. کمپرسور که بخش اصلی دستگاه است می‌تواند از نوع رفت و برگشتی، دوار (اسکرال، اسکرو و...) یا سانتریفوژ بوده که در بین کمپرسورها، کمپرسور نوع اسکرو دارای بالاترین راندمان است. در نوع Twin Screw به دلیل کاهش قطعات مکانیکی نسبت به انواع دیگر کمپرسور عمر مفید دستگاه در حد قابل توجهی افزایش یافته است. چیلرهای تراکمی مورد مقایسه در این مقاله از نوع Twin Screw با سیستم کنترل ظرفیت پیوسته[۳] بوده و دارای ضریب عملکرد $\mathrm{Cop} = ۲/۵$ هستند، که این مقدار نیز در بین چیلرهای تراکمی کم‌نظیر است. همچنین استفاده از کمپرسور اسکرو و مبدل‌های صفحه‌ای، ابعاد این چیلر را به میزان زیادی کاهش داده است. در جدول ۱، انواع چیلرهای جذبی و تراکمی از نظر راندمان، ظرفیت و قابلیت ذخیره انرژی مورد مقایسه قرار گرفته است.

چیلرهای تراکمی راهبری بسیار ساده‌تری دارند. به علت اینکه سیستم فشرده‌سازی گاز، الکتریکی است، کنترل بیشتری می‌توان روی فرایند داشت و می‌توان در حالت پاره‌بار با تمهیداتی، راندمان را بالا برد. در حالی که در چیلرهای جذبی در حالت نیمه‌بار، راندمان افت می‌کند. راه‌اندازی چیلرهای جذبی زمان و هزینه بیشتری دارد. تنظیم مشعل به کمک آنالیزور گاز، بسیار وقت‌گیر و نیازمند فرد متخصص است و عدم تنظیم صحیح مشعل، باعث تولید گازهای نسوخته، کاهش راندمان احتراق، ایجاد آلودگی و مصرف سوخت بیشتر می‌شود. جهت تأمین انرژی حرارتی چیلرهای گازسوز، نیازمند گازکشی در سطح شهر و ساختمان هستیم که خطرات این مسئله در هنگام وقوع حوادث طبیعی با توجه به قرارگیری کشور روی گسل‌های فعال، غیر قابل تصور است.

[2] Coefficient of Performance [3] continous control

جدول ۱: مقایسه انواع چیلرهای جذبی و تراکمی [۷].

نوع ماشین	تکنیک عملکرد	COP	ظرفیت قابل تأمین Btu/hr	دوره اورهال (هزار ساعت)	قابلیت ذخیره انرژی در حالت پاره‌بار
جذبی	تک‌اثره Li–Br	۰/۵ تا ۰/۷	۵ – ۴۰۰	–	خیر
	تک‌اثره NH_3	۰/۴ تا ۰/۶	۳ – ۱۰۰	–	خیر
	دواثره	۱ تا ۱/۳۵	۳۰ – ۵۰۰۰	–	خیر
	سه‌اثره	۱/۴ تا ۱/۷	۵۰ – ۵۰۰۰	–	خیر
تراکمی	رفت و برگشتی	۳ تا ۴	۲۵۰ >	۶	خیر
	اسکرال	۴ تا ۵	۲ – ۲۰	۲۵	خیر
	پیچی	۴/۵ تا ۵/۵	۳۰ – ۲۵۰	۴۰	بله
	روتاری	۳/۵ تا ۴/۵	۰/۵ – ۳	۲۵	خیر
	سانتریفیوژ	۶ تا ۸/۵	۴۰۰ – ۱۰۰۰۰	۶۰ تا ۸۰	بله

چون چیلرهای جذبی به کمک حرارت، تولید برودت می‌کنند، لذا حجم بسیار بالایی از حرارت در داخل ماشین موجود است که برای ادامه کارکرد دستگاه باید از دستگاه خارج شود. به علت حجم بسیار بالای این حرارت، ناگزیر به استفاده از سیستم آب خنک هستیم. برای تأمین این آب، از برج‌های خنک‌کن که بر مبنای سرمایش تبخیری کار می‌کنند استفاده می‌کنیم.

در سیستم‌های تبخیری، به علت حجم بسیار بالای تبخیر آب، هزینه بسیار بالایی برای تأمین آب ازدست رفته به مصرف‌کننده اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که تبخیر آب باعث به جا گذاشتن رسوبات در داخل برج خنک‌کن می‌شود که منجر به تغییر دائمی کیفیت و افزایش سختی آب در حین کارکرد می‌شود. مضافاً که هزینه‌های تأمین آب نرم و جداسازی رسوبات، تأسیسات جداگانه‌ای را می‌طلبد که هزینه‌های نصب و بهره‌برداری را به‌شدت افزایش می‌دهد. در حالی که در چیلرهای تراکمی به علت ماهیت مکانیکی عمل فشرده سازی، حجم بسیار کمتری از حرارت تولید می‌شود که منجر به کاهش سایز برج خنک‌کن، پمپ‌ها و تأسیسات نرم‌سازی آب می‌شود. تفاوت اصلی چیلرهای تراکمی در کمپرسور مورد استفاده در آن است. کندانسور چیلرهای تراکمی به دو صورت هوا خنک و آب خنک ساخته می‌شوند. نوع کندانسور تأثیر اساسی در طراحی چیلر دارد. کندانسورهای هوا خنک، حرارت مبرد در گردش در داخل کویل را به هوا منتقل می‌کنند.

ضریب انتقال حرارت جابجایی روی کویل به دبی هوای درحال گذر از روی کویل و دمای خشک منطقه بستگی دارد. به دلیل تغییر دمای خشک در طول روز، میزان حرارت قابل انتقال، تغییر می‌کند که باعث کاهش COP چیلر در طول روز می‌شود. در کندانسورهای آب خنک به دلیل اینکه در سمت بیرون آب جریان دارد، ضریب انتقال حرارت بالاتر است و لذا در ظرفیت یکسان چیلر، اندازه کندانسور آب خنک کوچک‌تر است و یا با در نظر گرفتن اندازه اولیه کندانسور، به دلیل کاهش دبی جرمی مورد نیاز در کندانسور، سایز کمپرسور کوچک‌تر می‌شود. به دلیل اینکه می‌توان به کمک کندانسور آب خنک به دمای پایین‌تری رسید، لذا فشار تخلیه کمپرسور کمتر می‌شود که این مسئله منجر به کوچک‌تر شدن کمپرسور، کاهش مصرف برق، بالا رفتن COP سیکل، افزایش عمر کمپرسور و افزایش قابلیت اعتماد سیستم می‌شود. به طور معمول ۲ عامل طراح را ملزم به انتخاب کندانسور هوا خنک می‌کند. هزینه‌های تهیه آب نرم و دمای مرطوب منطقه که امکان کارکرد برج خنک‌کن را نمی‌دهد. البته باید در نظر داشت که دمای خشک بالای منطقه، امکان استفاده از کندانسور هواخنک را نیز سلب می‌کند. در جدول ۲ مشخصات فنی چیلرهای تراکمی اسکرو و چیلرهای جذبی شعله مستقیم دواثره در سه ظرفیت مورد نظر آورده شده شده است [۸].

جدول ۲: مشخصات فنی چیلرهای جذبی شعله مستقیم دواثره.

	۱۰۰ تن	۲۱۰ تن	۴۰۰ تن
دبی آب سرد (m^3/hr)	۵۵	۱۲۷	۲۴۲
دمای ورود و خروج آب سرد (°)	۱۲ – ۷	۱۲ – ۷	۱۲ – ۷
افت فشار آب سرد (kPa)	۴۲	۴۵	۱۰۳
دبی آب خنک‌کننده (m^3/hr)	۹۱/۴	۲۱۰	۴۰۰
دمای ورود و خروج آب خنک‌کننده (°)	۳۲ – ۳۸	۳۷/۵	۳۷/۵
افت فشار آب خنک‌کننده (kPa)	۳۸	۸۸	۱۰۴
انرژی الکتریکی مورد نیاز دستگاه (kWh)	۳/۵۱	۶	۱۰/۷
دبی مصرف گاز (m^3/hr)	۳۷	۶۷/۳	۱۲۸
مصرف آب برج خنک‌کننده (m^3/hr)	۱/۸	۴/۲	۸

در حالت کلی برای انتخاب یک نوع چیلر پارامترهای متعددی تأثیرگذار است. پارامترهایی چون قیمت انرژی، هزینه نگهداری، عمر مفید تجهیزات، زمان و ترتیب روشن و خاموش شدن، ارتباط بین سرمایش و گرمایش در سیستم، اندازه، تجهیزات پیرامونی، هزینه نصب، هزینه بیمه و مالیات دستگاه، هزینه انرژی مصرفی، هزینه تأمین آب برج خنک‌کن و آب در گردش در سیستم و هزینه‌های سختی‌گیری از آب از آن جمله‌اند. به دلیل اینکه در اکثر ساعات روز، بار ساختمان کمتر از بار زمان پیک می‌باشد، لذا نحوه کارکرد چیلر در حالت پاره‌بار، در هنگام انتخاب نوع چیلر، باید درنظر گرفته شود. در کمپرسورهایی که بار را به طور منقطع دنبال می‌کنند مانند کمپرسورهای رفت و برگشتی، برای هماهنگی بین چیلر و بار، مجبور به استفاده از کنارگذر هستیم. کنارگذر باعث تلف شدن انرژی در سیستم می‌شود و لذا COP این سیستم‌ها در حالت پاره‌بار کاهش می‌یابد. کمپرسورهای رفت و برگشتی، اسکرال، روتاری از این دسته‌اند. در کمپرسورهایی که بار را به طور پیوسته می‌توانند دنبال کنند، در حالت پاره‌بار، به دلیل کاهش دبی در گردش مبرد در سیکل، کار مصرفی کمپرسور کاهش می‌یابد و لذا COP افزایش می‌یابد. کمپرسورهای سانتریفیوژ و اسکرو از این دسته‌اند. در کمپرسورهای سانتریفیوژ از طریق کاهش دبی ورودی کمپرسور و در کمپرسورهای اسکرو از طریق اسلاید ولو اینکار را انجام می‌دهند.

اهمیت میزان COP در حالت پاره‌بار قبلاً ذکر گردید. در استاندارد

ARI 98-590/550 برای مشخص کردن میزان متوسط این عدد در طول روز از معیاری به اسم IPLV استفاده نموده‌اند. لازم به ذکر است که ضرایب این رابطه تابع شرایط اقلیم است و برای شهر تهران این رابطه به شکل زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$\mathrm{IPLV} = ۰/۱۳A + ۰/۲۹B + ۰/۴۳C + ۰/۱۵D \qquad (۱)$$

A : COP در ٪۱۰۰ بار

B : COP در ٪۷۵ بار

C : COP در ٪۵۰ بار

D : COP در ٪۲۵ بار

مفهوم ضرایب بالا به این صورت است:

٪۱۳ ساعت در ٪۱۰۰ بار

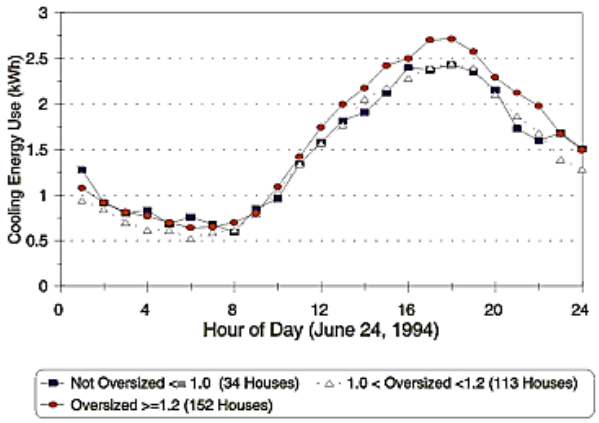
٪۴۳ ساعت در ٪۵۰ بار

٪۲۹ ساعت در ٪۷۵ بار

٪۱۵ ساعت در ٪۲۵ بار

۳ نتایج عددی و بحث

در اینجا برای بهتر مشخص شدن مزایای چیلرهای تراکمی سانتریفیوژ دور متغیر نسبت به سایر چیلرها در تناژهای بالای ۵۱۱ تن تبرید، یک ساختمان مسکونی با بار برودتی ۱۱۱۱ تن تبرید در تهران مورد مطالعه قرار داده شد. چهار نوع چیلر تراکمی سانتریفیوژ دور ثابت و دور متغیر، جذبی شعله مستقیم و پیچی با ظرفیت واقعی ۱۱۱۱ تن تبرید برای مقایسه در نظر گرفته شد. برای محاسبه بار از نرم افزار کریر استفاده گردید و روز اول مرداد به عنوان گرم‌ترین روز سال در نظر گرفته شد. میزان بار برودتی زمان پیک و بار ۲۴ ساعت ساختمان را از نتایج کریر استخراج کرده و برای کاهش اثر مقدار عددی بار در محاسبات انرژی، بار هر ساعت را نسبت به بار زمان پیک بی‌بعد کرده و به صورت درصد بیان کردیم. سپس براساس بار زمان پیک و نوع چیلر، سیستم تهویه مطبوع مربوطه طراحی گشت و تجهیزات متناسب با آن انتخاب گردید. در اینجا به دلیل اینکه هزینه‌های مربوط به فضا و فونداسیون دستگاه‌ها بستگی به پارامترهای متعددی دارد، لذا تنها مقدار فضای اشغالی و وزن دستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مجموع مصارف انرژی برق، گاز و آب هر سیستم به طور جداگانه محاسبه شد و در نهایت با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. در اینجا نیز برای بهتر مشخص کردن میزان مصارف انرژی، آن‌ها بر حسب بیشترین مقدار بی‌بعد کرده و به صورت درصد بیان کردیم. همچنین برای این پروژه، هزینه‌های خرید و نصب برای هر کدام سیستم‌ها براساس قیمت‌های سال ۹۱ محاسبه شد و مورد مقایسه قرار گرفت. بخشی از تجهیزات مانند فن کویل‌ها و لوله کشی بین فن کویل‌ها در چهار نوع سیستم یکسان است. لذا این تجهیزات از مقایسه حذف شد و تنها تجهیزات غیرمشترک در نظر گرفته شد. مدت زمان کارکرد هر سیستم به صورت یک دوره ۱ روزه و ۲۴ ساعت کار در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که میزان بار برودتی ساختمان نمونه در طول یک شبانه‌روز، برابر سطح زیر شکل ۱ ضرب در ۱۱۱۱ تن تبرید است. با توجه به IPLV هر ماشین در طول یک روز می‌توان مقدار انرژی مصرفی هر ماشین برای تولید این میزان انرژی برودتی را بدست آورد. مجموع مصارف برقی هر سیستم شامل مصارف پمپ‌ها، چیلر و فن برج خنک‌کن در نظر گرفته شده است. مجموع مصارف آبی هر سیستم نیز شامل آب جبرانی و بلودان است. در شکل ۱ نموداری از استاندارد ASHRE آورده شده است. حالت مطلوب و بهینه مصرف انرژی برای یک فضا می‌بایست شبیه به این نمودار باشد که در سال ۱۹۹۴ بدست آمده است.



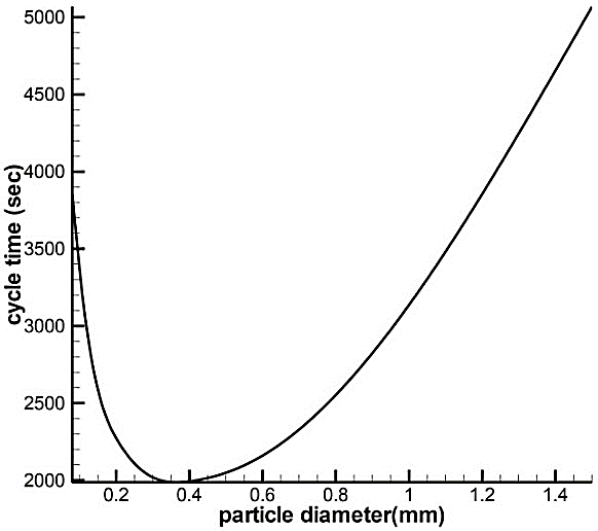
شکل ۱: بار ساختمان در طول ۲۴ ساعت ۲۴ ژوئن سال ۱۹۹۴ [۹].

همانطور که از شکل ۱ مشخص است، تنها در ٪۲۵ ساعات روز در ٪۸۰ الی ٪۱۰۰ درصد بار کل قرار داریم و ٪۷۵ ساعات روز در زیر ٪۸۰ ظرفیت چیلر را نیاز داریم. لذا اهمیت میزان COP ماشین در حالت پاره‌بار، خود را به‌خوبی مشخص می‌کند. در استاندارد ARI برای چیلرهای مختلف میزان COP برحسب میزان پاره‌بار مشخص گردیده است. یکی از پارامترهای مهمی که باید در مسیر ساخت چیلر جذب سطحی انتخاب شود قطر ذرات جاذب است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود یک مقدار بهینه برای زمان سیکل نسبت به قطر ذرات جاذب برابر ۲۰۰۰ ثانیه در قطر ۰/۳۷ میلی‌متر وجود دارد که البته باید توجه شود این مقدار وابسته به پارامترهای زیادی مانند نوع ذرات جاذب و سیال جذب شونده و ارتفاع فین است اما رفتار کلی یکسان است. با کاهش قطر ذرات، فضای خالی بین ذرات جاذب کاهش یافته و این باعث می‌شود سیال عامل جذب یا احیا شده مسیر سخت‌تری را از بین ذرات طی نماید و در واقع مقاومت انتقال جرم برون ذره‌ای افزایش یابد که این امر باعث افزایش زمان سیکل خواهد شد. با افزایش قطر ذرات جاذب، مقاومت درون ذره‌ای افزایش یافته و باعث می‌شود سیال عامل با سرعت کمتری در ذرات جاذب جذب یا احیا شود که این امر باعث افزایش زمان سیکل خواهد شد.

در بررسی عملکرد و فرایند طراحی چیلر جاذب سطحی دو پارامتر ضریب عملکرد (COP) و ظرفیت سرمایش مخصوص (SCP) اهمیت زیادی دارند که طبق رابطه (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

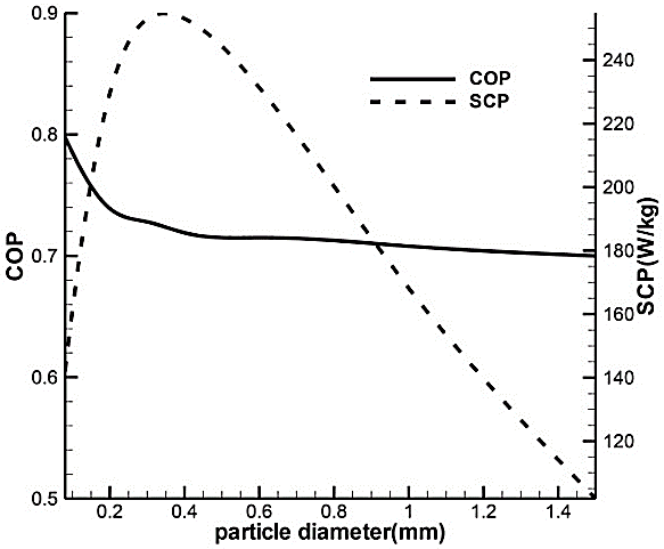
$$\mathrm{Cop} = \frac{Q_{\mathrm{evap}}}{Q_{\mathrm{heating}}} \qquad (۲)$$

$$\mathrm{SCP} = \frac{Q_{\mathrm{evap}}}{m_{\mathrm{silica\ gel}}\ \mathrm{cycle\ time}} \qquad (۳)$$



شکل ۲: تغییرات زمان سیکل برحسب قطر ذرات جاذب.

ظرفیت سرمایش با افزایش قطر ذرات جاذب مقادیر کمی کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که در مرحله سوم و چهارم که عمل جذب انجام می‌شود ذراتی که به لوله فلزی نزدیک‌تر هستند دارای فشار کمتری نسبت به سطح مشترک بین بستر و محفظه هستند. این اختلاف فشار داخل بستر در قطر ذرات کوچک‌تر بیشتر است و چون با کاهش فشار مقدار جذب تعادلی کاهش می‌یابد مقادیر بیشتری از بخار موجود در محفظه و اواپراتور جذب در ذرات جاذب شود و تا حدی ظرفیت سرمایش افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود ضریب عملکرد در قطر ذرات کوچک‌تر مقدار کمی بیشتر شود. همان طور که بیان شد زمان سیکل دارای یک مقدار کمینه است و ظرفیت سرمایش با تغییر قطر ذرات جاذب تغییر کمی دارد. جرم ذرات جاذب نیز تقریباً ثابت است بنابراین ظرفیت سرمایش مخصوص بیشتر تحت تأثیر زمان سیکل قرار دارد و همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود دارای یک مقدار حداکثر برابر ۲۵۰ W/kg در قطر ذره ۰/۳۷ میلی‌متر است.



شکل ۳: تغییرات ضریب عملکرد و ظرفیت سرمایش مخصوص برحسب قطر ذرات جاذب.

۴ مقایسه فنی و اقتصادی

چیلر تراکمی اسکرو، به علت استفاده از دو دستگاه چیلر با ظرفیت ۲۰۲ تن تبرید بالا تر از چیلر جذبی شعله مستقیم بوده در حالی که اختلاف هزینه‌های جاری بین دو سیستم ناچیز است، بنابرین به نظر می‌رسد استفاده از چیلرهای تراکمی در شرایط فعلی و با توجه به تعرفه‌های آب، برق و گاز تا ظرفیت ۲۰۰ تن تبرید دارای صرفه اقتصادی بوده و البته مقایسه بین چیلرهای مذکور، تنها در صورتی قابل انجام است که امکان انتخاب تمامی این ۲ نوع چیلر موجود بود، در غیر این صورت مقایسه و نتیجه‌گیری در مورد نوع خاصی، صحیح نیست. پارامترهای قیمت انرژی، هزینه نگهداری، عمر مفید تجهیزات، اندازه، تجهیزات پیرامونی، هزینه نصب، هزینه بیمه و مالیات دستگاه، هزینه انرژی مصرفی، هزینه تأمین آب برج خنک‌کن و آب در گردش در سیستم و هزینه‌های سختی گیری از عوامل محدودکننده امکان استفاده از انواع چیلرها هستند. با توجه به هزینه‌های بالای انرژی و هزینه‌های بسیار بالایی که آلایندگی تجهیزات سرمایشی و گرمایشی به کشور وارد می‌کند، لازم است مهندسین و دست‌اندرکاران صنعت تهویه مطبوع، ضمن در نظر گرفتن سیاست‌های کلان کشور در زمینه انرژی، محاسبات هزینه‌های اقتصادی طرح را قبل از انتخاب تجهیزات انجام دهند و براساس آن اقدام به انتخاب تجهیزات و تهیه طرح خود نمایند. همچنین بهترین مبنای مقایسه راندمان سیستم‌ها IPLV است چرا که COP تنها در یک نقطه بیان شده و نشان‌دهنده کارکرد ماشین در بارهای جزئی نیست. همچنین به نظر می‌رسد، لازم است دولت محترم در سیاست خود مبنی بر دادن یارانه برای دارندگان چیلرهای جذبی تجدید نظر کند.

هزینه اولیه در ظرفیت‌های ۵۰ تا ۲۰۰ تن تبرید، در چیلرهای جذبی به طور میانگین ٪۵۰ بیشتر از چیلرهای تراکمی می‌باشد. هزینه اولیه در ظرفیت‌های ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ تن تبرید، در چیلرهای تراکمی به طور میانگین ٪۸ بیشتر از چیلرهای جذبی می‌باشد (در صورت استفاده از چیلرهای سانتریفوژ یا چیلرهای با ظرفیت بالاتر و تعداد کمتر، هزینهٔ اولیه چیلرهای تراکمی کمتر از جذبی خواهد شد). در چیلرهای جذبی هزینه ماهانه مصرف آب در هر دو بخش مسکونی و آموزشی به طور میانگین دو برابر چیلرهای تراکمی است که با شرایط بحران آب قابل تأمل می‌باشد و در صورت استفاده از چیلرهای تراکمی هوایی این مشکل بر طرف خواهد شد.

۵ نتیجه‌گیری

در چیلرهای تراکمی هزینه ماهانه مصرف برق در هر دو بخش خانگی و آموزشی به طور میانگین ۶/۵ برابر چیلرهای جذبی است. هزینه‌های جاری چیلرهای جذبی در ساختمان‌های مسکونی به طور متوسط دو و نیم برابر چیلرهای تراکمی اسکرو می‌باشد. هزینه‌های جاری چیلرهای جذبی در ساختمان‌های آموزشی به طور متوسط یک و نیم برابر چیلرهای تراکمی اسکرو می‌باشد. هزینه ماهانه تعمیر و نگهداری در ظرفیت‌های ۵۰ تا ۲۰۰ تن تبرید، در چیلرهای جذبی به طور میانگین ٪۵۰ بیشتر از چیلرهای تراکمی می‌باشد. هزینه ماهانه تعمیر و نگهداری در ظرفیت‌های ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ تن

تبرید، در چیلرهای تراکمی به طور میانگین ٪۵ بیشتر از چیلرهای جذبی می‌باشد در صورت استفاده از چیلرهای سانتریفوژ یا چیلرهای با ظرفیت بالاتر و تعداد کمتر، هزینهٔ ماهانه تعمیر و نگهداری چیلرهای تراکمی کمتر از جذبی خواهد شد. در صورت استفاده از سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت (CHP) می‌توان از چیلرهای تراکمی استفاده نمود که راندمان بالاتری خواهد داشت. با توجه به این که امکان تولید برق از روش‌های متعددی نظیر انرژی خورشیدی، باد، آب و ... وجود دارد لذا در صورت سرمایه‌گذاری در این زمینه‌ها، با استفاده از سیستم‌های تراکمی، آلودگی‌های زیست محیطی را کاهش داد. بایستی از گاز به منظور تولید محصولات استفاده کرد و از صرفاً مصرف کردن آن خودداری نمود زیرا در صورت مصرف بی‌رویه، قابل تولید مجدد نمی‌باشد. در ساختمان‌های با کاربری منقطع (آموزشی، اداری و ...) چون امکان خاموش کردن چیلرهای جذبی وجود ندارد، مصرف انرژی بالاتر از چیلرهای تراکمی می‌باشد.

مراجع

[۱] شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت. www.ifco.ir.

[۲] میلانی، هادی و جامعی، مهدی. بررسی چیلرهای جذبی گازسوز و چیلرهای تراکمی از دیدگاه انرژی. در *نخستین همایش چیلر و برج خنک کن ایران*. هم‌اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۸۹.

[۳] نوروزی، مهدی. بهینه‌سازی و شبیه‌سازی سیستم تبرید جذبی (لیتیوم بروماید–آب،تک‌اثره). در *نخستین همایش چیلر و برج خنک کن ایران*. هم‌اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۸۹.

[۴] عابدی، افشین و خسرویان، کسری. مقایسه فنی و اقتصادی چیلرهای جذبی و تراکمی. در *نخستین همایش چیلر و برج خنک کن ایران*. هم اندیشان انرژی کیمیا، ۱۳۸۹.

[5] Dingeç, Haldun and İleri, Arif. Thermoeconomic optimization of simple refrigerators. *International Journal of Energy Research*, 23(11):949–962, 1999.

[6] Yumrutaş, Recep, Kunduz, Mehmet, and Kanoğlu, Mehmet. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems. *Exergy, An International Journal*, 2(4):266 – 272, 2002.

[7] Selbaş, Reşat, Kızılkan, Onder, and Şencan, Arzu. Thermoeconomic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle. *Energy*, 31(12):2108 – 2128, 2006.

[۸] شریفی بیدگلی، حسین، زارع، محمودحسین، رادمنش، افشین، و سلطانی، مازیار. مقایسه چیلر های جذبی، تراکمی پیچی و سانتریفیوژ با رویکرد فنی و اقتصادی. در *چهارمین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش، و تهویه مطبوع*، ۱۳۹۱.

[9] James, P.W., Cummings, J., Klongerbo, J.F., Sonne, J.K., and Vieira, R.K. The effect of residential equipment capacity on energy use, demand, and run-time. *ASHRAE Transactions*, 103, 12 1997.