

ارزیابی سیستم هیدرونیک^۱ "پمپاژ توزیع دور متغیر"

چکیده

پیشرفت علم الکترونیک و امکان کنترل دور موتورهای الکتریکی با راندمان بالا [۱]، امکان مدیریت این هزینه ها فراهم شده است. به این طریق میتوان به یکی دیگر از اهداف مهم یک سیستم هیدرونیک ایده آل که در آن مصرف انرژی مطابق با شرایط بار لحظه ای تغییر کند، دست یافت. یکی از این گزینه ها سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر است که در این مقاله به معرفی، بررسی ابعاد و جوانب آن و ارزیابی این سیستم در مقایسه با سیستم جریان ثابت پرداخته خواهد شد.

کلیات

در سیستم های هیدرونیک از گرمای محسوس آب استفاده می شود. انتقال حرارت از/ به آب تابعی است از مقدار دبی جریان، حرارت مخصوص و مقدار افزایش یا کاهش درجه حرارت آب در هنگام عبور از میدل [2].

$$q_w = 4180Q\Delta t \quad (1)$$

این مقدار حرارت، توسط کویل یا میدل حرارتی از / به آب منتقل میشود و این نرخ انتقال حرارت از / به سیال گرم یا سرد شونده، به مساحت سطح انتقال حرارت، متوسط اختلاف درجه حرارت بین سیال سرد و گرم و ضریب کلی انتقال حرارت که تابعی از سرعت و خواص سیالها و هندسه سطوح انتقال حرارت است بستگی دارد و به صورت رابطه (۲) بیان میشود.

$$q = U.A.LMTD \quad (2)$$

حال چنانچه در یک کویل با سطح انتقال حرارت مشخص، دبی جریان آب (سیال گرم یا سرد شونده) کاهش یابد، طبق رابطه (۳) فرم نوسلت، ضریب انتقال حرارت سمت آب مادامی که جریان مغشوش^۶ باشد، با توان

۰/۸ سرعت کاهش میابد. [۳]

$$\frac{hD}{K} = 0.023 \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C\mu}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3)$$

حال از آنجایی که سایر مشخصات - از جمله ضریب انتقال حرارت سمت هوا و دمای ورودی سیالها- ثابت هستند ضریب کلی انتقال حرارت کاهش اندکی خواهد داشت، لذا تا درصدی از کاهش دبی، کاهش نرخ انتقال حرارت اندک و بعد از آن با کاهش اندک دبی، این نرخ افزایش ناگهانی خواهد داشت. شکل (۱) عملکرد یک کویل نمونه را نشان میدهد.

با توجه به رابطه (۲) هر عاملی که به نحوی ضریب کلی انتقال حرارت، مساحت انتقال حرارت و اختلاف دمای لگاریتمی^۷ را تغییر دهد، باعث

در یک سیستم هیدرونیک^۱، هر عاملی که به نحوی اختلاف دمای طراحی را کاهش و به تبع آن دبی را افزایش دهد، باعث افزایش انرژی مصرفی خواهد شد. از جمله عوامل فوق الذکر می توان به لوله کنارگذر، شیرهای کنترلی سه راهه و یا دو راهه با لوله کنارگذر اشاره نمود. اغلب سیستمهای هیدرونیک، یک یا چند عامل انرژی بر فوق را دارند ولی برخی سیستم ها به سبب داشتن مزایایی از جمله تثبیت اختلاف دمای طراحی مدار در شرایط پاره بار^۲ و به تبع آن کاهش دبی و هزینه های پمپاژ، نسبت به سیستم جریان ثابت ارجحیت دارند. در سیستم های جریان ثابت، هیچگونه توجهی به تطابق انرژی مصرفی با بار لحظه ای نمیشود. در حالیکه در سیستم هیدرونیک پمپاژ توزیع دور متغیر^۳، با جدا نمودن مدار تولید و توزیع و استفاده از پمپهای دور متغیر در مدار توزیع این امکان فراهم میشود که: الف) مقدار دبی در مدار توزیع را متناسب با نوسانات بار تغییر داده و با کاهش جریان و ثابت نگه داشتن اختلاف دمای هر مدار، مصرف انرژی و هزینه پمپاژ را کاهش دهیم ب) به دلیل عدم همزمانی پیک بار^۴ها، پمپ مدار تولید و چیلر را بر اساس دبی پیک کلی بار^۵ انتخاب نموده و همزمان با برداشتن هد پرفشار ترین مدار از روی پمپ مدار تولید، توان کل مصرفی پمپاژ را کاهش دهیم ج) در حالت آرایش چیلرهای موازی، میتوان در شرایط پاره بار با از مدار خارج شدن یک چیلر، پمپ مربوط به آن را نیز در حلقه اولیه خاموش کنیم و به این ترتیب انرژی مصرفی را متناسب با بار لحظه ای تغییر دهیم.

کلمات کلیدی: سیستم هیدرونیک، هزینه پمپاژ، پمپاژ توزیع دور متغیر

مقدمه

سیستم هیدرونیک ایده آل، سیستمی است که در آن از پیچیدگی های غیر ضرور پرهیز شده و کنترل، تعمیر و نگهداری آن ساده و مصرف انرژی آن مطابق با شرایط بار لحظه ای باشد و در حالت پاره بار به درستی و مطابق طرح عمل کند. شناخت انواع سیستم های هیدرونیک این امکان را به طراحان می دهد که با توجه به موارد مذکور به انتخاب بهترین سیستم اقدام کنند.

سیستم هیدرونیک جریان ثابت به لحاظ سادگی، بیشتر مورد توجه قرار میگیرد. در این سیستم صرفه جوئی مصرف انرژی اهمیت چندانی نداشته و پمپها همواره با دبی مجموع پیک بارها در حال کار هستند. با توجه به سهم عمده مصرف انرژی و هزینه های پمپاژ از کل هزینه ها و همچنین

¹ Hydronic System

² Part Load

³ Variable Speed Distributed Pumping

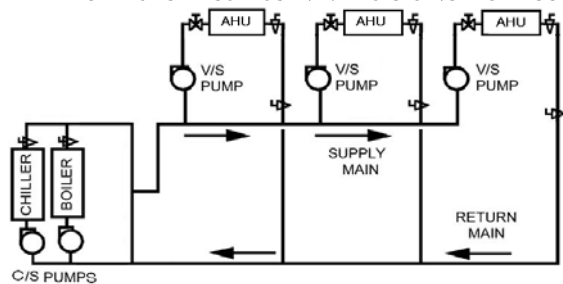
⁴ Peak Load

⁵ Block Load

⁶ Turbulant

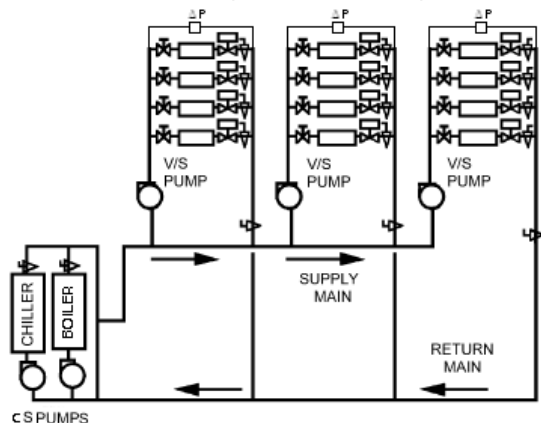
⁷ Log-Mean Temperature Difference

پمپهای توزیع دور متغیر، جریان را از حلقه اولیه دریافت و بین مصرف کننده ها توزیع میکنند. [5] این سیستم میتواند مشترک طراحی شود و در زمستان آبگرم بویلر توسط پمپ مربوطه وارد مدار شود (شکل ۲).



شکل ۲: نمونه سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر

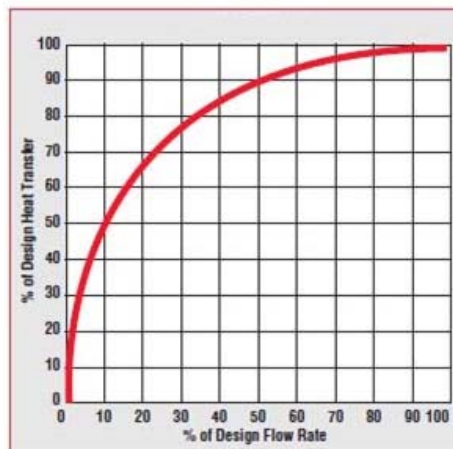
هر مدار توزیع، یک مصرف کننده را تغذیه میکند و دور پمپ توزیع توسط کنترلر دما یا رطوبت مربوطه به همان زون^۵ تعیین میگردد. در سیستمهای سیستمهای تمام آب و یا حالتی که چندین هواساز در یک مدار قرار گیرد کنترل ظرفیت پایانه ها توسط شیر دوراها انجام شده و سرعت پمپهای توزیع، توسط کنترل کننده اختلاف فشار که جهت دستیابی به حداکثر صرفه جویی در هزینه پمپاژ در انتهای مدار نصب میشود تعیین میگردد [6] شکل (۳). پایانه ها، تجهیزات فرعی و سیستم لوله کشی هر زون بر اساس مجموع پیک بارها و تجهیزات مرکزی و پمپها در مدار اولیه بر اساس پیک کلی بار ساختمان انتخاب می شوند.



شکل ۳: نمونه سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر در سیستم تمام آب

همچنین در سیستمهای تمام آب میتوان با آنالیز پروفیل بار ساختمان، نواحی که تغییرات بار آنها نسبت به زمان یکسان و زمان وقوع پیک بار آنها در یک بازه زمانی است شناسائی نمود و آنها را در یک زون قرار داد، به همین ترتیب میتوان ساختمان را به چندین زون تقسیم کرد و هر زون را توسط یک سری پمپ توزیع دور متغیر که دبی آن برابر با مجموع دبی پیک بار فضاهای آن زون میباشد، تغذیه نمود. در این حالت شیرهای کنترل دوراها و ترانسمیتر^۶ اختلاف فشار حذف و ترانسمیترهای اختلاف دما روی انشعاب های رفت و برگشت رایزر، نصب شده و در هر لحظه اختلاف دمای لوله رفت و برگشت انشعاب های رایزر را به یک کنترلر DDC^۷ ارسال نموده و این کنترلر با پردازش ورودیها بر اساس برنامه

تغییر منحنی عملکرد کویل میشود که از جمله میتوان به تغییر تعداد ردیفهای کویل، سرعت هوا و دمای سیالهای ورودی به کویل اشاره نمود.



شکل ۱: نمودار عملکرد یک کویل نمونه

سیستم هیدرونیکی دبی ثابت

در این سیستم لازم است تا همواره جریان ثابتی که برابر با مجموع پیک بارها است از سیستم عبور داده شود.

شیرهای کنترلی در این سیستم با کاهش جریان عبوری از کویل، نرخ انتقال حرارت را در شرایط پاره بار کاهش میدهند. با توجه به اینکه رابطه نرخ انتقال حرارت و دبی آب در یک کویل، رابطه ای خطی نیست (شکل ۱) استفاده از شیرهای با منحنی مشخصه درصد مساوی^۱، این امکان را فراهم میسازد که رابطه حرکت ساقه شیر و نرخ انتقال حرارت به حالت خطی تبدیل شود.

منحنی مشخصه شیر کنترل با فرض ثابت بودن افت فشار شیر در حالت تمام باز و تمام بسته بدست می آید، ولی در عمل با کاهش دبی عبوری از کویل، اختلاف فشار دو طرف شیر افزایش می یابد، لذا هر چه توانایی^۲ شیر که نسبت افت فشار شیر در حالت کامل باز به کامل بسته است، افزایش یابد انحراف منحنی مشخصه شیر کمتر خواهد بود. که این امر مستلزم در نظر گرفتن افت فشار مناسب شیر در حالت تمام باز است که به صورت سر انگشتی برابر با افت فشار کویل است. عدم توجه به موارد ذکر شده، بزرگ انتخاب کردن کویل و بالانس نشدن بای پاس شیر کنترل، باعث عدم کارایی شیر کنترل میشود. مضاف بر این در اکثر سیستمهای تمام آب از شیرهای کنترلی در فن کویل ها استفاده نمی شود و صرفا با تغییر دور فن، کنترل صورت میگردد که این امر با توجه به رابطه (۱) باعث کاهش اختلاف دمای سیستم میشود، که در حالت سرمایه گذاری باعث کاهش دمای آب برگشتی به چیلرها شده، لذا چیلرها در اکثر اوقات در حالت پاره بار، که کاهش C.O.P^۳ دستگاه را در پی خواهد داشت [4]، کار می کنند.

سیستم هیدرونیکی پمپاژ توزیع دور متغیر

در این سیستم آب چیلر / بویلر توسط پمپهای دور ثابت، جرابی برابر با دبی پیک کلی بار ساختمان در حلقه اولیه^۴ به گردش در می آورند و

^۵ Zone

^۶ Transmitter

^۷ Direct Digital Control

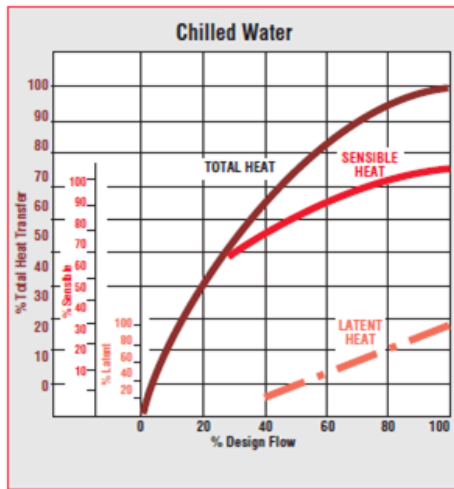
^۱ Equal Percent

^۲ Authority

^۳ Coefficient Of Performance

^۴ Primary Loop

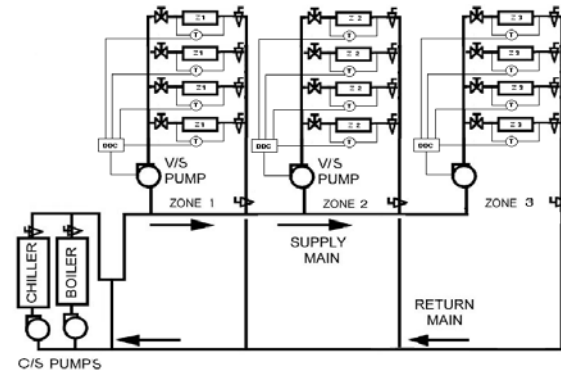
همچنین با کاهش دبی، بار نهان^۲ کویل با شیب تندتری کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در کویل نمونه در شکل (۵) کاهش ۲۰٪ دبی، ظرفیت نهان کویل را ۲۰٪ کاهش می‌دهد و این امر میتواند رطوبت‌گیری کویل را در شرایط پاره بار دچار اختلال نماید. از طرفی بیشترین بار نهان مربوط به هوای تازه^۳ است، لذا چنانچه هوای تازه توسط هوارسان مجهز به کویل رطوبت‌گیر تأمین شود، بار نهان هوای تازه از روی کویل برداشته می‌شود و ضریب حرارت محسوس^۴ افزایش می‌یابد. البته در ساختمانهای تجمعی که بار نهان افراد زیاد است باید در شرایط پاره بار، ظرفیت نهان فن کویل‌ها بررسی شود تا در این شرایط رطوبت نسبی فضا از محدوده آسایش^۵ خارج نشود.



شکل ۵: نمونه عملکرد یک کویل در حالت سرمایش

با توجه به مشخصات هندسی و عمومی ساختمان از قبیل جهت‌گیری جدارهای خارجی، نوع کاربری، تعداد و زمان حضور افراد و...، پیک بار فضاها در یک زمان اتفاق نمی‌افتد و پیک کلی بار ساختمان همواره مقداری کوچکتر یا به ندرت مساوی با جمع پیک بارها خواهد بود، و این بدان معنی است که حداکثر تقاضای دبی برابر با دبی پیک بار کلی ساختمان خواهد بود و میتوان پمپ حلقه اولیه و تجهیزات مرکزی را بر اساس این مقدار انتخاب نمود. در حالت تمام بار مجموع دبی مدارها مساوی دبی مدار اولیه است و هیچ آبی از لوله کنار گذر عبور نمیکند. در شرایط پاره بار و به تبع آن کاهش دبی مدارها، دبی در حلقه اولیه بیشتر از میزان تقاضا شده و مقداری آب از لوله رفت به لوله کنارگذر جریان می‌یابد و دمای برگشتی به چیلرها را کاهش می‌دهد، با ادامه کاهش تقاضا، چیلرها یک به یک از مدار خارج میشوند که در این حالت همزمان با خارج شدن هر چیلر از مدار میتوان پمپ مربوط به آن را نیز از مدار خارج نمود. مجدداً با افزایش دبی مدارها، میزان تقاضا بیشتر از دبی تولید شده در حلقه اولیه شده و مقداری آب از لوله برگشت به لوله کنارگذر جریان می‌یابد و پمپ و چیلر مجدداً به مدار می‌آیند، لذا تعداد پمپ و چیلر در حال کار در مدار اولیه به اندازه‌گیری جهت و مقدار آب در لوله کنارگذر وابسته است که میتوان به صورت مستقیم با نصب جریان سنج دقیق^۶ و

ذخیره شده، دور پمپ تغذیه را به نحوی تعیین میکند تا اختلاف دما در هر مدار در تمامی حالات - اعم از پاره بار یا تمام بار - در محدوده طراحی قرار گیرد. شکل (۴)



شکل ۴: نمونه سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر در یک سیستم تمام آب بدون استفاده از شیرهای کنترلی

کنترل دمای هر فضا به صورت مستقل و توسط ترموستات اتافی که دور موتور فن کویل را جهت تثبیت دما تغییر می‌دهد انجام می‌پذیرد و کنترلر هر زون دور پمپ مدار مربوطه را چنان تعیین می‌کند تا در هیچ انشعابی اختلاف دمای آب رفت و برگشت از میزان طراحی بیشتر نگردد. در شرایط پاره بار و کاهش دمای هوای ورودی به فضا، ترموستات دور فن را کاهش می‌دهد و ظرفیت کویل کاهش یافته و با توجه به رابطه (۱) اختلاف دمای آب در عبور از فن کویل‌ها کاهش می‌یابد. این اختلاف دما در تمامی انشعاب‌های رفت و برگشت رایزر در هر زون به سیستم کنترل مرکزی همان زون ارسال شده و کنترلر دور پمپ را به میزانی کاهش میدهد تا اختلاف دما در هیچ انشعابی بیشتر از میزان طراحی نگردد. از آنجائیکه تغییر بار نواحی واقع در یک زون، نسبت به زمان تقریباً یکسان است، تغییرات اختلاف دمای آب عبوری از فن کویل‌ها در تمامی انشعاب‌های رایزر در زمانهای مختلف در یک محدوده می‌باشد. با کاهش دبی، ظرفیت کویل با یک رابطه غیر خطی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در یک کویل نمونه مطابق شکل (۵) کاهش ۲۰٪ دبی، ظرفیت کویل را تنها ۷٪ کاهش می‌دهد و با توجه به رابطه (۱) اختلاف دمای آب به میزان ۱۶/۳٪ افزایش یافته و به مقدار طراحی نزدیک میگردد.

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{0.93}{0.8} = 1.163$$

مجدداً با افزایش بار، ترموستات جهت تثبیت دما، دور فن را افزایش داده و به تبع آن اختلاف دمای آب افزایش می‌یابد و کنترلر جهت حفظ اختلاف دما در محدوده طراحی دور پمپ را افزایش میدهد.

سازندگان فن کویل، ظرفیت کویل در دور و دبی‌های مختلف را توسط جداولی ارائه میدهند که با کمک این جداول میتوان گراف عملکرد کویل در شرایط مختلف را ترسیم کرد. با توجه به شکل (۵) چنانچه کویل بزرگتر از حد مورد نیاز انتخاب شود، در دبی کمتری به ظرفیت مورد نظر میرسیم و با توجه به اینکه با دور شدن از دبی ۱۰٪، نمودار عملکرد کویل شیب تندتری دارد، در شرایط پاره بار و با کاهش اندک دبی، ظرفیت کویل افت زیادی داشته و کنترل را دچار مشکل می‌کند.

² Latent Heat

³ Fresh Air

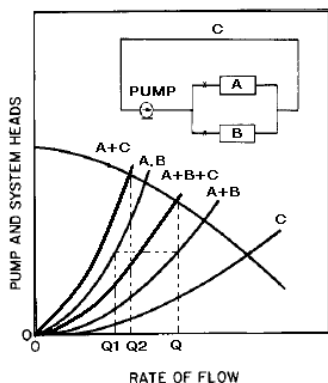
⁴ Sensible Heat Factor

⁵ Comfort Zone

⁶ Flow Meter

¹ Over Size

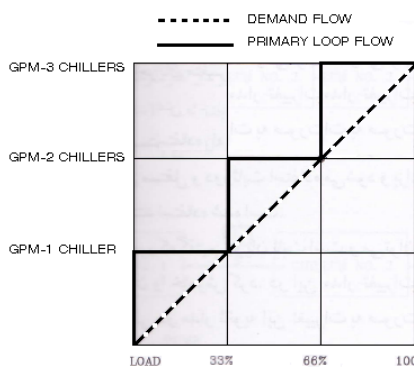
به Q_2 تقلیل یافته و به برخی بارها که به صد در صد دبی نیاز دارند جریان کافی نمی‌رسد.



شکل ۶: منحنی عملکرد سیستم جریان ثابت در آرایش موازی چیلرها

در سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر، دور پمپهای توزیع در هر زون، متناسب با کاهش بار در زون مربوطه کاهش یافته و از این طریق با توجه به قانون تشابه پمپها^۲ انرژی مصرفی پمپاژ کاهش می‌یابد. با توجه به عدم همزمانی پیک بار زونها، حداکثر میزان تقاضای دبی مدارها برابر با دبی پیک کلی بار ساختمان است که این میزان دبی در حالت تمام بار توسط پمپهای مدار اولیه در مدار تجهیزات مرکزی به گردش در می‌آید، لذا چیلر را میتوان بر مبنای پیک کلی بار انتخاب نمود و از این طریق هزینه سرمایه گذاری اولیه را نیز کاهش داد.

در صورت استفاده از آرایش موازی چیلرها در این سیستم، با توجه به جدا بودن مدار تولید و توزیع و از آنجائیکه پمپهای مدار توزیع، دبی مدارها را متناسب با بار لحظه ای تغییر میدهند، با کاهش بار زون ها در شرایط پاره بار، پمپ های توزیع، دبی مدارها را متناسب با بار به صورت تدریجی کاهش میدهند و در این شرایط با خارج شدن یک چیلر از مدار میتوان پمپ مربوط به آن را نیز در حلقه اولیه خاموش نمود. لذا دبی در حلقه اولیه متناسب با کاهش دبی تقاضای مدارها به صورت پله ای و به نحوی تغییر میکند تا همواره بزرگتر یا مساوی دبی تقاضای مدارها باشد. شکل (۷).



شکل ۷: تغییرات دبی تقاضای مدارها و دبی در مدار اولیه نسبت به بار

دو چیلر مشابه و پمپهای مربوطه به هر یک را در آرایش موازی مانند شکل (۸) در نظر بگیرید. در حالت تمام بار، منحنی مقاومتی چیلرهای A, B به ترتیب از منحنی مشخصه پمپهای P1, P2 به صورت سری، کسر شده

کالیبره شده در لوله کنار گذر، مقدار و جهت جریان در لوله کنار گذر را مشخص نمود [۷]. البته توالی کار چیلرها در این سیستم را میتوان از طریق دمای برگشتی به چیلرها در پائین دست لوله مشترک نیز کنترل نمود [۷]. بدین صورت که در حالت تمام بار دبی در مدار اولیه برابر با میزان تقاضای بارهاست و اختلاف دما برابر مقدار طراحی بوده و آبی از لوله کنار گذر عبور نمیکند، همزمان با کاهش بار، میزان تقاضا کمتر از دبی در حلقه اولیه شده و مقداری آب از لوله رفت از طریق لوله کنار گذر به لوله برگشت میریزد و دمای برگشتی به چیلرها را کاهش می‌دهد و با رسیدن به نقطه تنظیم، یک پمپ و چیلر از مدار خارج میشود و با افزایش بار، دبی تقاضا بیشتر از دبی حلقه اولیه شده و دمای آب برگشتی به چیلرها افزایش می‌یابد و در این حالت پمپ و چیلر مجدداً وارد مدار میگردد.

برتریهای سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر نسبت به جریان ثابت

در سیستم جریان ثابت، دبی پمپها همواره ثابت و بر اساس مجموع پیک بارها محاسبه میشود و در شرایط پاره بار نیز نمیتوان مصرف انرژی را منطبق با بار کاهش داد. از طرفی سازندگان چیلر محدوده جریان آب عبوری از اوپراتور چیلر را به نحوی تعیین میکنند تا سرعت آب در داخل کوئل اوپراتور از ۱۱ فوت بر ثانیه تجاوز نکنند و از سایش^۱ لوله ها جلوگیری شود. حال اگر تجهیزات مرکزی را بر اساس پیک کلی بار انتخاب کنیم از آنجائیکه دبی پمپ بر اساس مجموع دبی پیک بارهاست، سرعت آب در لوله های اوپراتور افزایش می‌یابد و چنانچه از مقدار طراحی تجاوز کند خوردگی سایشی لوله های اوپراتور و کاهش عمر مفید چیلر را در پی خواهد داشت. لذا چنانچه تفاوت مجموع پیک بارها و پیک کلی بار ساختمان زیاد باشد تجهیزات مرکزی را میبایستی با استفاده از مجموع دبی پیک بارها انتخاب نماییم که این امر باعث بزرگتر انتخاب شدن تجهیزات مرکزی خواهد شد و این مسأله کارکرد مداوم چیلر در حالت پاره بار و متعاقب آن کاهش COP را در پی خواهد داشت. در این سیستم در صورت استفاده از آرایش موازی چیلرها، در حالت پاره بار با کاهش برخی بارها و خارج شدن یک چیلر از مدار، به علت عبور جریان آب از چیلر خاموش و مخلوط شدن آن با جریان آب عبوری از چیلرهای در حال کار، دمای آب رفت سیستم افزایش می‌یابد، لذا چیلرهای در حال کار جهت تثبیت دمای رفت سیستم باید در دمای کمتری کار کنند که این امر باعث کاهش COP چیلرهای در حال کار میشود. حال اگر در این حالت روی چیلرها، شیر کنترلی نصب کنیم تا همزمان با از مدار خارج شدن چیلر شیر کنترلی بسته شود و مانع عبور جریان از چیلر خاموش شود با توجه به شکل (۶) چنانچه شیر کنترلی هر دو چیلر باز باشد منحنی مقاومتی چیلر A و چیلر B به صورت موازی با هم جمع شده، منحنی مقاومتی کل مدار چیلرها (منحنی A+B) را تشکیل میدهند و جمع سری دو منحنی مقاومتی چیلرها و مدار لوله کشی (منحنی C) منحنی سیستم را تشکیل میدهند. نقطه تلاقی منحنی سیستم و منحنی مشخصه پمپ نقطه کارکرد سیستم با دبی Q را نشان میدهد، در این حالت دبی هر یک از چیلرها Q_1 خواهد بود. حال فرض می‌کنیم در حالت پاره بار، چیلر B از مدار خارج شده و شیر کنترلی آن بسته شود. در این حالت جمع سری دو منحنی A و C، منحنی سیستم را تشکیل داده و دبی سیستم

² Pumps Affinity Law

¹ Erosion

دبی ۱۰٪ کاهش یابد، توان مصرفی پمپ به میزان ۲۷٪ کاهش و چنانچه دبی ۵۰٪ کاهش یابد توان مصرفی ۸۸٪ کاهش می‌یابد. لذا هزینه پمپاژ در سیستم توزیع دور متغیر نسبت به سیستم جریان ثابت بسیار کمتر خواهد بود و این امر کاهش هزینه‌های جاری راهبری را در پی دارد. حال به تشریح موارد ذکر شده در حالت‌های گوناگون می‌پردازیم.

- سیستم تمام آب بدون شیرهای کنترلی:

در حالت جریان ثابت با توجه به رابطه (۴) قسمتی از توان پمپاژ که صرف غلبه بر افت مدار میشود با فرض داشتن n مدار برابر است با:

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_{\max}}{367.3 \eta_p \eta_m}$$

و قسمتی از توان مصرفی که صرف غلبه بر افت مدار تجهیزات مرکزی میشود برابر است با:

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_{ch}}{367.3 \eta_p \eta_m}$$

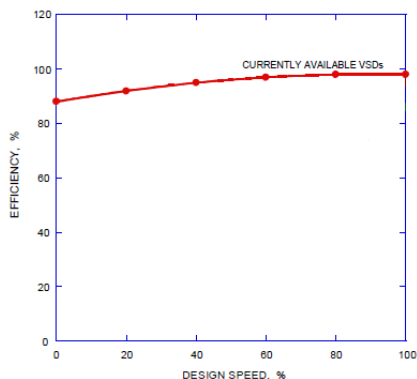
در سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر توان کل مصرفی برابر با مجموع توان مصرفی پمپ مدار اولیه و پمپ مدارهای توزیع است. توان مصرفی پمپاژ در حلقه اولیه با داشتن دبی پیک کلی بار و افت مدار تجهیزات برابر است با:

$$P_{pr} = \frac{Q_b \cdot H_{ch}}{367.3 \eta_p \eta_m}$$

و مجموع حداکثر توان مصرفی پمپهای توزیع یعنی زمانیکه فرض کنیم تمامی پمپها با حداکثر دور کار میکنند با داشتن n مدار برابر است با:

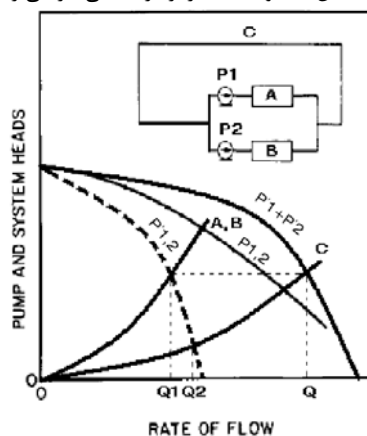
$$(P_{dp})_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_i}{367.3 \eta_p \eta_m \eta_v}$$

در رابطه فوق راندمان محرک دور متغیر^۳ در مخرج کسر اضافه شده است. این راندمان به هنگام کاهش دور موتور مطابق شکل (۹) تغییر میکند که در حداکثر دور موتور، این مقدار حدود ۹۸٪ است و از آنجائیکه در مدارهای هیدرونیکی به ندرت دبی در شرایط پاره بار از ۵۰ درصد کمتر میشود لذا کمترین مقدار راندمان در این حالت حدود ۹۳٪ خواهد بود.



شکل ۹: منحنی نمونه تغییر راندمان محرک دور متغیر نسبت به بار موتور

و سپس منحنی‌های حاصل شده (منحنی P1 و P2) به صورت موازی جمع می‌گردند (منحنی P1+P2). تقاطع این منحنی با منحنی سیستم (منحنی C) نقطه کارکرد با دبی Q را مشخص مینماید. در این حالت دبی هر یک از پمپها Q1 و برابر مقدار طراحی خواهد بود. همزمان با کاهش بارها و از مدار خارج شدن چیلر B و پمپ P2، تلاقی منحنی سیستم و منحنی (P1) نقطه کارکرد جدید با دبی Q2 خواهد بود. در این حالت دبی چیلر در حال کار افزایش ناگهانی داشته و تا زمانی که کنترل‌های چیلر این تغییر را حس کرده و خود را با شرایط تطبیق دهند دمای آب خروجی از چیلر افزایش یافته و تعادل دمائی سیستم از بین میرود. تغییرات مقدار جریان در واحد زمان باید در محدوده معینی صورت پذیرد تا سیستم کنترل چیلر به درستی عمل نماید، که این نرخ در چیلرهای پیشرفته امروزی حدود ۳۰ درصد مقدار جریان در هر دقیقه میباشد. جهت پرهیز از این شرایط میتون پمپهای مدار اولیه را نیز دور متغیر نمود و توسط فرمان ترانس‌میتور اختلاف فشار در دو طرف چیلر، دور پمپ چیلر در حال کار را کاهش داده و نقطه کارکرد را به دبی طراحی رساند.



شکل ۸: منحنی عملکرد سیستم جریان متغیر در آرایش موازی چیلرها

هزینه پمپاژ

توان مصرفی پمپاژ توسط رابطه زیر محاسبه میشود. [8]

$$P = \frac{Q \cdot H}{367.3 \eta_p \eta_m} \quad (۴)$$

در سیستم جریان ثابت، دبی پمپ برابر با مجموع دبی پیک بارها است و هد^۱ آن صرف غلبه بر دو افت، بر افت فشارترین مدار و افت فشار تجهیزات مرکزی میشود. در حالیکه در سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر به خاطر جدا بودن مدار تولید و توزیع، با انتخاب پمپ مرکزی بر مبنای دبی پیک کلی بار و با برداشتن هد بر افت فشارترین مدار از روی پمپهای اولیه، توان کل مصرفی پمپاژ را کاهش می‌دهیم. توان مصرفی در مدار تولید، صرف گردش دبی پیک کلی بار و غلبه بر افت فشار مدار تجهیزات و توان مصرفی در مدار توزیع، صرف گردش دبی مجموع پیک بارها و غلبه بر افت فشار مدار مربوطه میشود، از طرفی پمپهای توزیع، متناسب با بار، دبی را تغییر میدهند و با توجه به قانون تشابه پمپها توان مصرفی هر پمپ متناسب با توان سوم دبی آن تغییر میکند. لذا در شرایط پاره بار، توان مصرفی پمپهای توزیع با تغییر دبی کاهش می‌یابد، به طوری که اگر

¹ Head

² Head Loss

³ Variable Speed Drive Efficiency

با مقایسه مقادیر P_1 با $(P_{dp})_{max}$ و P_2 با P_{pr} و با توجه به اینکه H_{max}

مربوط به پرافت ترین مدار است و $Q_b < \sum_{i=1}^n Q_i$ خواهیم داشت :

$$P_2 > P_{pr} \quad \Rightarrow P_1 + P_2 > (P_{pr} + P_{dp})_{max}$$

$$P_1 > (P_{dp})_{max}$$

ماکزیمم توان مصرفی در سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر در شرایطی که فرض کردیم پیک بارها در یک لحظه اتفاق بیافتد و تمام پمپهای توزیع در حداکثر دور کار کنند بدست آمده است. ولی در عمل به دلیل عدم همزمانی پیک بارها، مجموع دبی پمپهای توزیع برابر با دبی پیک کلی بار است و در این شرایط برخی از پمپهای توزیع در شرایط پاره بار کار میکنند، لذا توان کلی مصرفی سیستم در شرایط پیک از توان مصرفی ماکزیمم بدست آمده کوچکتر خواهد بود.

$$P_1 + P_2 > (P_{pr} + P_{dp})_{peak}$$

از طرفی توان مصرفی در سیستم دبی ثابت در تمامی شرایط همواره ثابت است. اما در سیستم جریان متغیر، توان کل مصرفی متناسب با بار لحظه ای تغییر میکند و این بدان معنی است که در طول دوره کارکرد سیستم، توان مصرفی در سیستم جریان متغیر بسیار کوچکتر از توان مصرفی در سیستم جریان ثابت خواهد بود.

- سیستم های هوایی :

در سیستم جریان ثابت، کنترل ظرفیت کویل هواسازها توسط شیرهای کنترلی سه راهی صورت میگیرد و از آنجائیکه جهت بهبود توانایی شیر کنترل، افت فشاری معادل ۲۰٪ الی ۵۰٪ حلقه مدار در حالت تمام باز برای شیر در نظر میگیریم [2]، این افت فشار باعث افزایش هد و در نتیجه افزایش توان مصرفی پمپ خواهد شد. حال با فرض افت فشاری معادل ۴۰٪ افت حلقه مدار برای شیر کنترل و داشتن n هواساز در مدار پمپ، قسمتی از توان که صرف غلبه بر افت فشار مسیر، کویل و شیر کنترل میشود برابر است با :

$$P_1 = \frac{\sum_{i=1}^n 1.4Q_i \cdot H_{max}}{367.3\eta_p\eta_m}$$

و قسمتی از توان مصرفی که صرف غلبه بر افت مدار تجهیزات مرکزی میشود برابر است با :

$$P_2 = \frac{\sum_{i=1}^n 1.4Q_i \cdot H_{ch}}{367.3\eta_p\eta_m}$$

در سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر در حالتی که هر هواساز در یک مدار قرار گیرد و توسط پمپ توزیع دور متغیر اختصاصی تغذیه شود، شیرهای کنترلی حذف شده و حداکثر توان مصرفی پمپهای توزیع و اولیه برابرنند با :

$$(P_{dp})_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot H_i}{367.3\eta_p\eta_m\eta_v} \quad P_{pr} = \frac{Q_b \cdot H_{ch}}{367.3\eta_p\eta_m}$$

با مقایسه با مقادیر P_1 و P_2 در حالت سیستم جریان ثابت خواهیم داشت :

$$P_1 + P_2 \gg (P_{pr} + P_{dp})_{peak}$$

از طرفی توان مصرفی در سیستم دبی ثابت در تمامی شرایط همواره ثابت است. اما در سیستم جریان متغیر، توان کل مصرفی متناسب با بار لحظه ای تغییر میکند و این بدان معنی است که در طول دوره کارکرد سیستم، توان مصرفی در سیستم جریان متغیر بسیار کوچکتر از توان مصرفی در سیستم جریان ثابت خواهد بود. در این حالت با توجه به حذف شیرهای کنترلی کویل هواسازها، به صرفه جوئی بیشتری در هزینه های پمپاژ دست یافته ایم.

حال چنانچه در سیستم توزیع دور متغیر از چند هواساز در یک مدار استفاده کنیم، کنترل ظرفیت کویل هر هواساز توسط شیر کنترل دو راهه انجام میشود که در این حالت توان مصرفی پمپ توزیع نسبت به حالت قبلی افزایش می یابد. اما با توجه به اینکه پمپ توزیع، دور متغیر است و با کاهش دور در شرایط پاره بار توان کمتری مصرف میکند، لذا کماکان در طول دوره کارکرد توان کمتری نسبت به سیستم جریان ثابت مصرف میکند.

بحث بر روی نتایج

طراحی یک سیستم بر اساس حالت تمام بار صورت می پذیرد، ولی از آنجائیکه یک سیستم در بیشتر اوقات در حالت پاره بار قرار دارد، طراحی و انتخاب سیستم باید به گونه ای باشد تا در این شرایط نیز علاوه بر برطرف نمودن تمامی بارها، مصرف انرژی آن نیز متناسب با بار کاهش یابد. در سیستم دبی ثابت، پمپها همواره با دبی مجموع پیک بارها در حال کار هستند لذا در شرایط پاره بار کاهش مصرف انرژی امکان پذیر نیست و در این شرایط اختلاف دمای سیستم کاهش می یابد و به تبع آن چیلرها اکثراً در شرایط پاره بار کار میکنند. همچنین در سیستم جریان ثابت در صورت استفاده از آرایش موازی چیلرها، کنترل و تثبیت دمای رفت سیستم در شرایط پاره بار، همزمان با از مدار خارج شدن یک چیلر، مستلزم کاهش COP چیلرهای در حال کار است. در سیستم توزیع دور متغیر به علت جدا بودن مدارهای تولید و توزیع، انتخاب چیلر بر اساس پیک کلی بار صورت میگیرد که این امر سرمایه اولیه را کاهش می دهد، جریان متناسب با بار لحظه ای تغییر میکند و توان مصرفی پمپاژ کاهش می یابد. این توان مصرفی حتی در شرایط پیک از توان مصرفی در سیستم جریان ثابت کمتر است. در آرایش موازی چیلرها و در شرایط پاره بار می توان پمپ چیلر خاموش را از مدار خارج نمود. در این حالت مشکلاتی نظیر افزایش دمای رفت سیستم بعلاوه عبور جریان آب از چیلر خاموش و یا کاهش COP چیلرهای در حال کار، که در سیستم جریان ثابت با آنها مواجه بودیم بر طرف شده است.

نتیجه گیری

باید پذیرفت که سیستم پمپاژ توزیع دور متغیر اندک پیچیدگی هائی نسبت به سیستم جریان ثابت دارد اما با در نظر گرفتن مزایائی از جمله انتخاب تجهیزات مرکزی بر اساس پیک کلی بار، تطبیق انرژی مصرفی با بار لحظه ای، کاهش هزینه های پمپاژ و به تبع آن کاهش هزینه های راهبری، کنترل پذیری سیستم در شرایط پاره بار استفاده از این سیستم را توجیه میکند.

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
C	گرمای ویژه سیال ($kg \cdot ^\circ C \cdot j$)
D	قطر معادل هیدرولیکی (m)
G	سرعت جرمی سیال ($kg / m^2 \cdot s$)
h	ضریب انتقال حرارت ($w / ^\circ C \cdot m^2$)
H	هد پمپ (m)
K	ضریب هدایت حرارتی سیال ($w / ^\circ C \cdot m$)
LMTD	اختلاف دمای متوسط لگاریتمی ($^\circ C$)
P	توان (w)
Q	دبی حجمی (m^3/hr)
q _w	انتقال حرارت (w)
U	ضریب انتقال حرارت ($w / ^\circ C \cdot m^2$)

علائم یونانی

η	راندمان
μ	ویسکوزیته سیال ($kg / m \cdot s$)

زیر نویس ها

ch	چیلر
dp	پمپ توزیع
m	موتور
p	پمپ
pr	پمپ اولیه

مراجع

۱ - نوید نصیری، ۱۳۸۴، "کنترل دور موتورهای AC"، صنعت تأسیسات، شماره ۷۴، صفحه ۴۵

2 - Ashrae Handbook , "Air conditioning Systems & Equipment" , 2000

۳- محمدرضا خوش گفتار پسیخانی، ۱۳۷۴، "مقدمه ای بر طراحی ترموهیدرولیکی مبادلهای حرارتی"

4 - Donald R.wulfinghoff, "Energy efficiency manual", Energy Institute press ,1999

5 - Erwin G,Hansen., "Hydronic System Design and Operation" , McGraw-Hill . 1985

6 – monger, Samuel c .,"HVAC Systems :operation , Maintenance ,Optimization"

۷- بهرام خاکپور، ۱۳۸۵، "سیستمهای هیدرونیک، سرمایش و گرمایش با آب"

8 – Pump Handbook , Third Edition , McGRAW-HILL