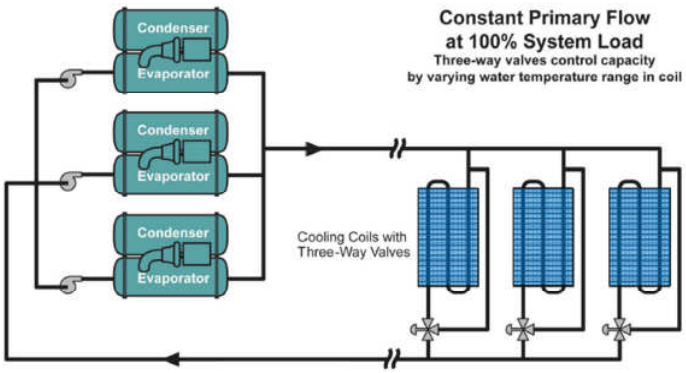
با سلام خدمت همکاران عزیز،

امشب مطالبی را در خصوص نحوه طراحی لوله کشیهای های اولیه – ثانویه ، مزایا و معایب آن، در گروه قرار خواهم داد. البته سیستمهای لوله کشی چیلر و بویلر در موتورخانه ها، به 3 دسته کلی تقسیم میشوند که به قرار زیر است :

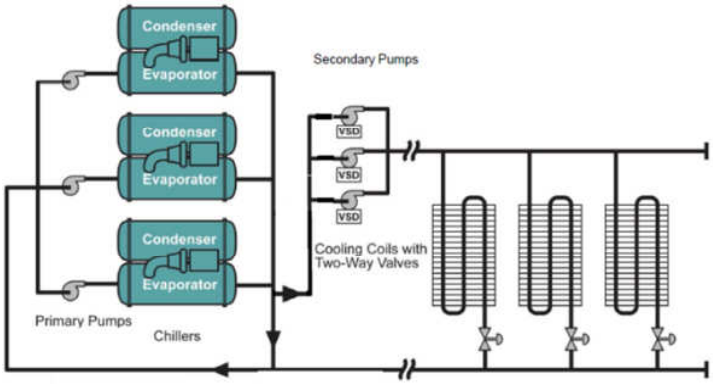
## 1- سیستم لوله کشی با دبی ثابت:

که در ایران سالیان سال هست که کار میشه .این سیستم بخاطر مشکلات خاص خود و نداشتن انرژی سیوینگ در کشورهای توسعه یافته مورد استفاده نیست (دلایل آن را در انتها خواهم گفت).



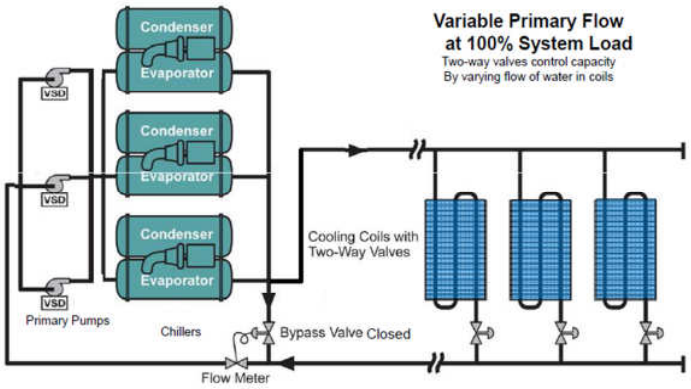

## 2- سیستمهای های اولیه و ثانویه:

که ازحالت اول خیلی جدیدتر است و دارای انرژی سیوینگ بالاتری است و دارای مزایا و معایب خود است. این سیستم حدود 30 سال هست که برای مثال در امریکا کار شده و اینجا سیستم جدیدی بحساب نمیآید.




3- جدیدترین نوع لوله کشی که بالاترین انرژی سیوینگ را در حال حاضر دارد و سیستم دبی متغیر است :

که امروزه برای اکثر سیکلهای چیلر از این سیستم استفاده میشود. این سیستم بمانند سیستم اول است با این تفاوت که دبی مدار کاملا متغیر میباشد.




اگر خاطر دوستان باشد، قبلا در خصوص چگونگی کاهش مصرف انرژی در این سیستمهای دبی متغیر صحبت کرده بودم(بهمراه عمکس و نمودار).

بنده امشب به نحوه طراحی سیستم دوم یعنی اولیه و ثانویه میپردازم و مثالهایی را ارائه خواهم کرد و اگر فرصتی بود یا فردا شب، راجب 2 سیستم دیگر نیز بحث خواهیم کرد.

**سیستمهای اولیه-ثانویه:**

طراحی سیستم های دو مداره در موتورخانه ها ایده جدیدی نیست و برای سالیان سال مورد استفاده قرار میگرفته است. در این نوع طراحی لوپ به 2 قسمت تقسیم میشود اولیه و ثانویه. بخشی از لوپ که در سمت موتورخانه قرار گرفته است را اولیه و بخشی که سمت ساختمان یا مصرف کننده هست را ثانویه مینامیم.

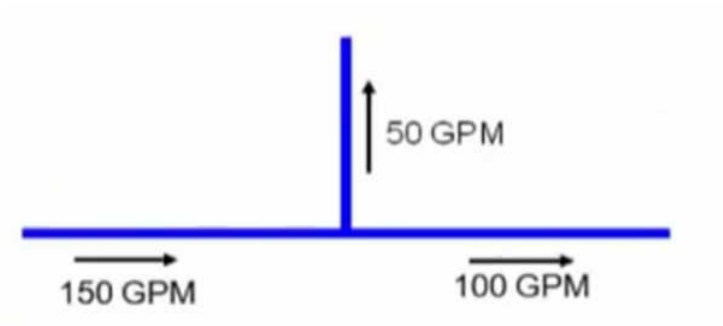
دلیل عمده استفاده از چنین سیستم هایی جهت توزیع اینست که:

1- میتوان برای سیرکولاسیون سیال از پمپ های کوچکتر استفاده کرد با تغییر دادن دلتا تی. برای مثال میتوان در لوپ اولیه با دلتا تی بزرگتر GPM را کوچک کرد و از پمپ و لوله کشی کوچکتری استفاده نمود.
2- میتوان کنترل خیلی بهتری بر جریان سیال در فضاهای مختلف داشت که هر دوی این فاکتورها سبب کاهش محسوس مصرف انرژی خواهد شد.
3- میتوان از این سیستم برای پروژه های با وسعت زیاد که برداشت از موتورخانه بالا هست استفاده کرد. مثلا موتورخانه مرکزی داریم که 5 موتورخانه فرعی از آن برداشت میکنند. در این حالت یک لوپ اولیه طراحی

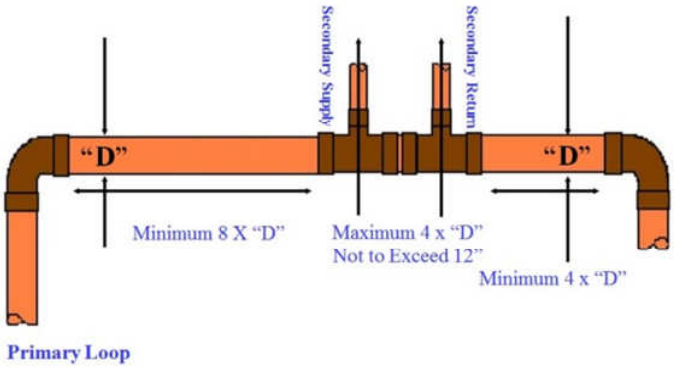
میکنیم که سایر موتورخانه ها به ازای نیاز خود از آن برداشت میکنند. البته در مواردی نیز ناچار به طراحی لوپهای اولیه–ثانویه–ثالثیه هستیم.

قبل از وارد شدن به بحث چند نکته را ضروری میدانم که اشاره کنم.

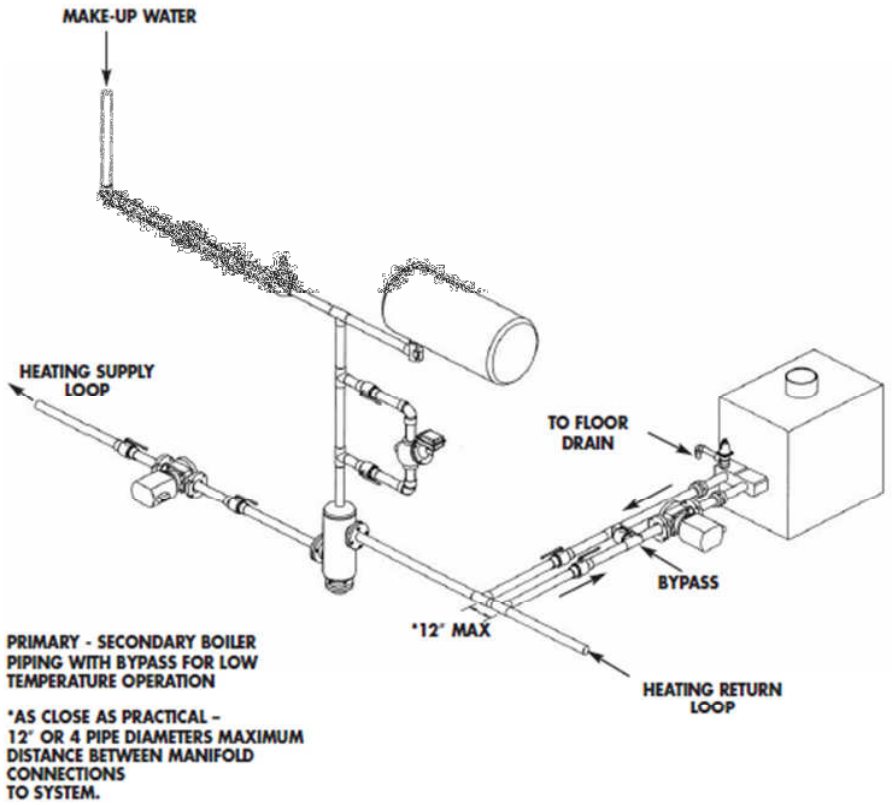
1- در یک سه راهی لوله، همیشه جریان وارد شده به یک نقطه برابر است با جریان خارج شده از آن. دقیقا همان چیزی که در مدارهای برقی داریم:




2- مسئله بعدی در مورد لوله مشترکی است که بین دو لوپ اولیه و ثانویه کار میشود. توجه داشته باشیم که این لوله مشترک باید بگونه ای طراحی گردد که دبی مدار اول روی دبی مدار دوم تاثیر نگذارد و بلعکس. برای اینکه به این مهم دست پیدا کنیم بایستی افت فشار لوله مشترک خیلی کوچک باشد. بر این اساس خیلی از شرکتهای بویلر سازی ابعاد و اندازه لوله مشترک را برای استفاده در سیکلهای اولیه و ثانویه در کاتالوگهای خود میدهند. مثلا در تصویر زیر طول لوله را بیشتر از 12 اینچ ماکزیمم بیشتر اجازه نمیده.



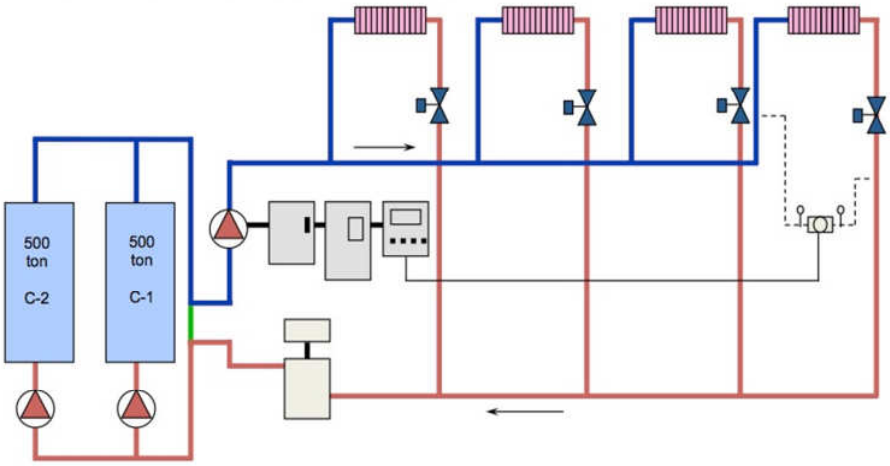

یا تصویر زیر از شرکت بویلر سازی LOCHINVAR که طول این لوله را ماکزیمم 12 اینچ یا 4 برابر قطر لوله دانسته.



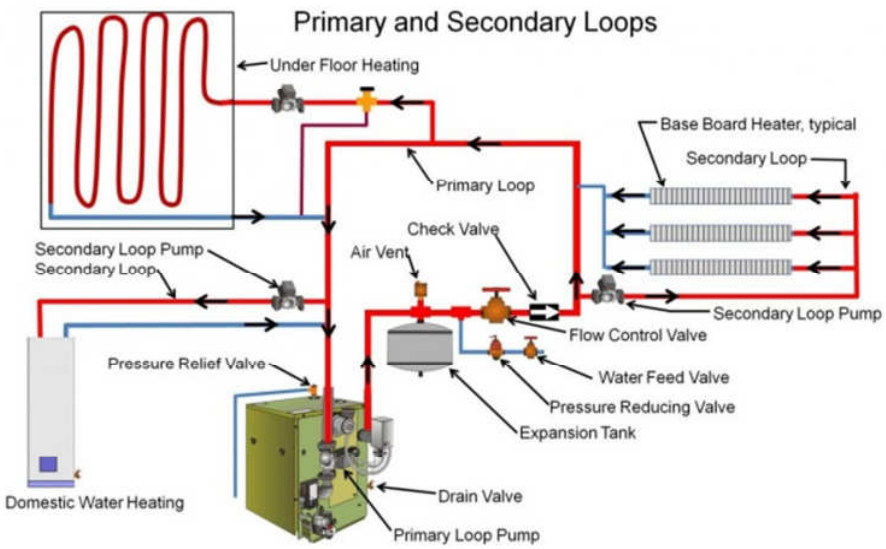

البته یک نکته را هم همینجا عنوان کنم که افت فشار نزدیک به صفر بیشتر در سیستمهای گرمایش بویلر کار میشه و برای سیستم چیلر بدلیل مشکلاتی که صحبت خواهیم کرد از شیرهای کنترلی و یک طرفه در لوله مشترک استفاده میکنیم. بنابراین در سیستم چیلر نمیتوان الزاما گفت که افت فشار در لوله مشترک نزدیک به صفر است.

## اصول طراحی:

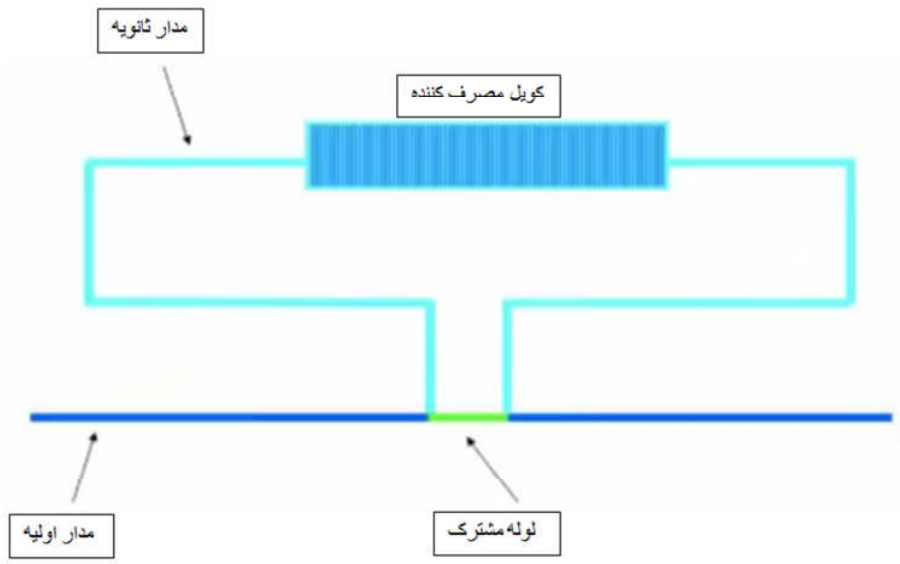
مبنای طراحی بدین گونه است که یک جریان ثابت در مدار اولیه در گردش است و در مدار های ثانویه هر مدار بر اساس نیاز ساختمان خود از آن برداشت میکند. لذا پمپ مورد استفاده در مدار اولیه دور ثابت و در مدارهای ثانویه از نوع دورمتغیر بهمراه کنترلر VFD خواهد بود. از این سیستم در اکثر ساختمانهای بلند مرتفع جهت توزیع هم در سیکل گرمایش بویلر و هم در سیکل سرمایش چیلر استفاده میشود. در ضمن لوله مشترک به نامهای COMMON PIPE، DECOUPLER PIPE و یا NEUTRAL BRIDGE شناخته میشود. شکل زیر نمونه عملی یک سیکل اولیه ثانویه برای چیلر است.



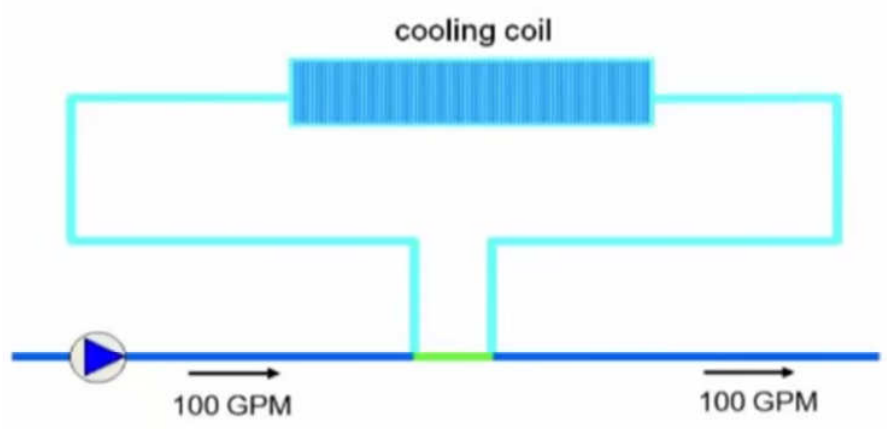

تصویر زیر هم برای سیستم گرمایش بویلر است که برداشتهای مختلفی از سیکل اولیه را نشان میدهد.



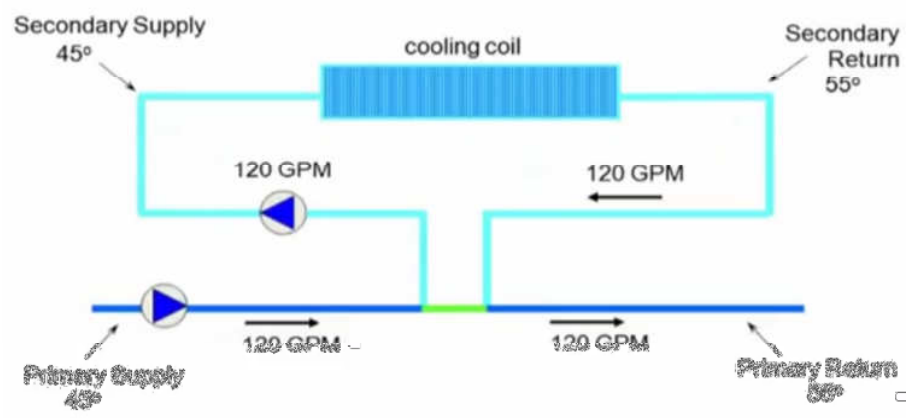

ابتدا لازم است برای درک بهتر مطلب، گام به گام به شرایطی که در لوپهای اولیه ثانویه در خصوص درجه حرارت و دبی، اتفاق میافتد اشاره ای داشته باشیم. در زیر بخشی از مدار را قرار داده ام:




در تصویر زیر همان مدار دیده میشود با این تفاوت که یک پمپ در مدار اولیه قرار داده شده است. همانطور که مشاهده میکنید چون پمپی در مدار ثانویه نداریم و افت فشار در لوله مشترک بسیار پایین است، دبی گذرا از مدار ثانویه صفر است. لذا تمام دبی از لوله مشترک عبور خواهد کرد.

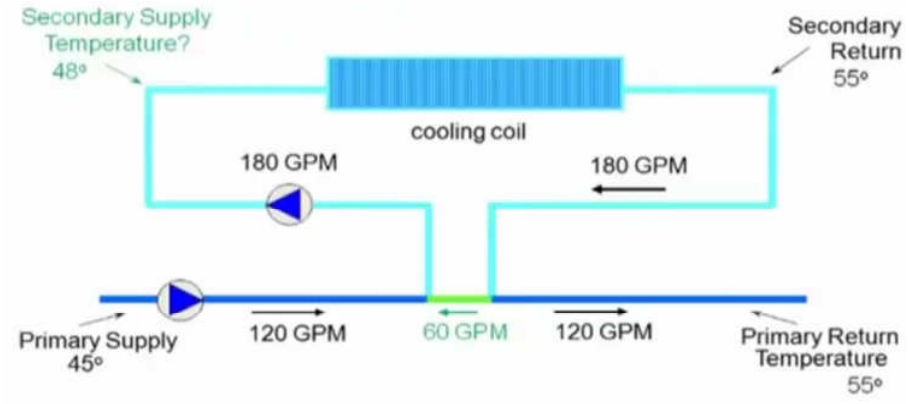



حال پمپ در مدار دوم را نیز اضافه میکنم. فرض میکنیم که برای مثال،کویل 120GPM با دلتا تی 10 درجه طراحی کرده ایم. درجه حرارت ورودی و خروجی از کویل را هم 44 و 54 درجه فارنهایت در نظر گرفته ایم. با توجه به شکل زیر مقدار 120GPM آب از مدار اولیه وارد مدار ثانویه میشود. مقدار دبی گذرا از لوله مشترک برابر صفر است و دلتا تی هم در دو مدار برابر 10 درجه است.




حالت دیگری که ممکن است پیش بیاد تصویر زیر است. که درآن بجای دبی گذرای 120 GPM از مدار ثانویه مقدار بیشتری مثلا 180 GPM داریم. این حالت زمانی اتفاق میافتد که مدار ثانویه یا در کل بخش مصرف کننده بالانس نشده باشد. و مشکلی که ایجاد میکند اینست که دلتا تی در کویل کاهش می یابد. کاهش دلتا تی هم که مشکلات خاص خودش را دارد. همچنین توجه داریم که در لوله مشترک بدلیل افت فشار نزدیک به صفر، دبی معکوس شده است. بنابراین دمای ورودی به کویل برابر میشود با 48 بجای 45 ، چرا ؟

T=(120X45)+(60X55)/180=48

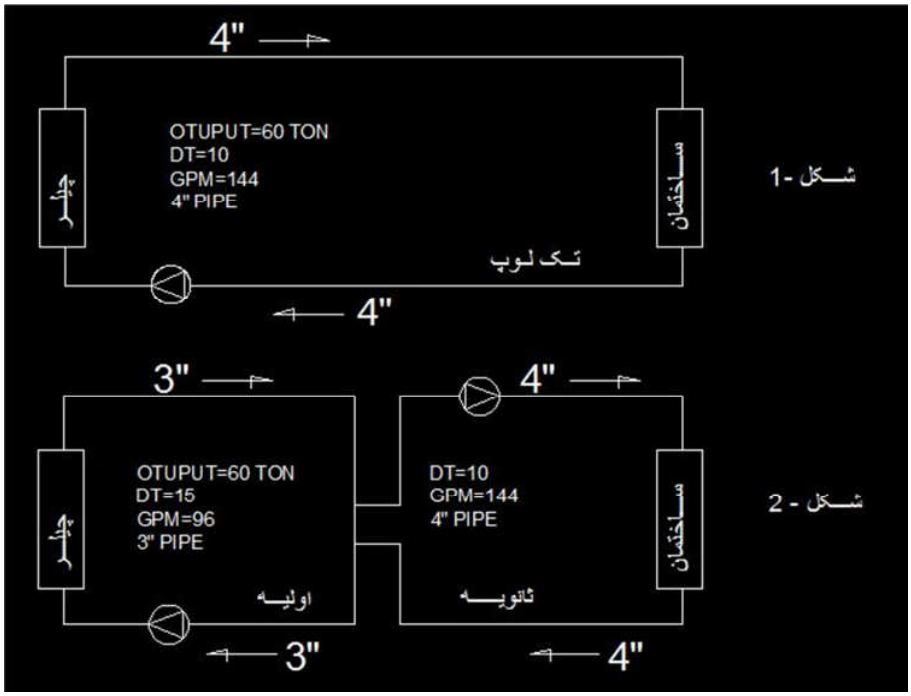



بنابراین بایستی سعی شود که از ایجاد این حالت جلوگیری کنیم. حال قبل از پرداختن به مثالهای عددی، نکات مثبت طراحی را در نظر میگیریم:

## کاهش هزینه های لوله کشی :

مدار چیلری را در نظر بگیرید با ظرفیت واقعی 60 تن و اختلاف دمای 10 درجه در سیستم سنتی. با توجه به تصویر پایین حدود gpm144 در مدار با سایز لوله 4 اینچ خواهیم داشت. حال همین مدار را به مانند شکل دوم به لوپ اولیه – ثانویه تبدیل میکنیم. در مدار اولیه با تغییر اختلاف دما به 15 درجه، دبی را تا GPM96 کاهش داده و از سایز لوله 3

اینچ بجای 4 اینچ استفاده میکنیم. سپس اختلاف دمای مجدد 10 درجه را در لوپ ثانویه برای ساختمان استفاده میکنیم. توجه داریم که با استفاده از لوپهای اولیه – ثانویه در موتورخانه، برای تغییر اختلاف دما در مدار اولیه، دستمان کاملا باز است و همین باعث کاهش چشمگیری در هزینه های لوله کشی خواهد شد. طراحی سیستم برای بویلر نیز کاملا مشابه است با این تفاوت که در لوپ اولیه، از DT=25-30 درجه و در لوپ ثانویه از DT=20 درجه استفاده خواهیم کرد.




## کاهش هزینه های انرژی:

در مدار ثانویه، بایستی از پمپهای دور متغیر استفاده کرد. دور این پمپ ها توسط دستگاه VFD که در موتورخانه نصب شده است کنترل میگردد (به ازای هر پمپ یک VFD). دستگاه های VFD از سیستم هوشمند ساختمان (FMS) فرمان میگیرند. تعیین دبی متغیر پمپ ها، نیز توسط سنسورهایِ DP در ساختمان اندازه گیری میشوند که این سیگنال به FMS فرستاده میشود. این کاهش مصرف انرژی را قبلا کامل بحث کرده ایم.

## کاهش هزینه های انرژی در سیرکولاسیون:

در همان تصویر بالا برای مدار سنتی، در صورت محاسبه پمپ با نرم افزار bell and gossett خواهیم داشت:

Q=144GPM , H=40FT
EFF= 74.8% , HP= 1.9

اما در مدار اولیه – ثانویه داریم :

**در مدار اولیه :**

Q=96 GPM , H=25FT
EFF= 77.2% , HP= 0.7

**در مدار ثانویه :**

Q=144 GPM , H=15FT
EFF= 68.4% , HP= 0.5

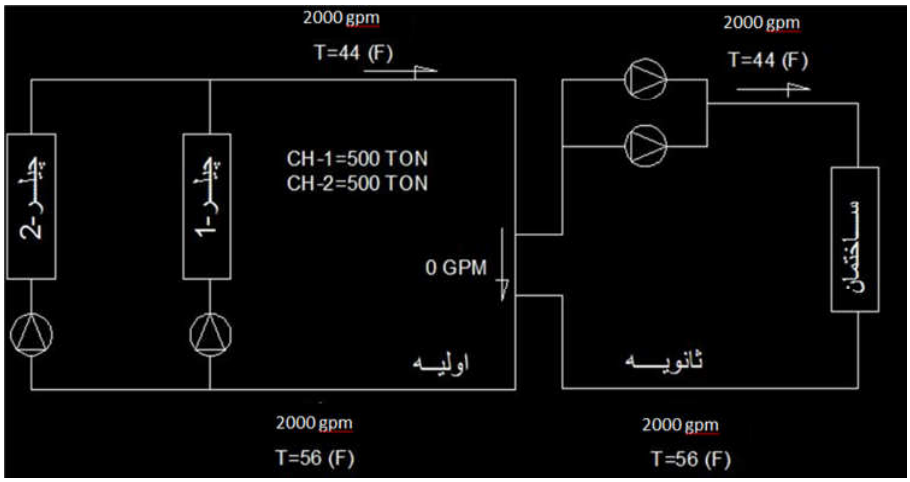
و در نهایت HP کل سیستم، برابر 1.2=0.7+0.5 خواهد بود که در مقایسه با تک لوپ، سیستم دارای HP پایینتری خواهد بود.

مثال عملی - **طراحی جهت لوپ چیلر :**

ساختمانی را در نظر بگیرید که نیاز سرمایشی آن در بار ماکزیمم برابر TON 2000 است. دو چیلر داریم با ظرفیت TON 500 واقعی. DT را در هر دو مدار اولیه و ثانویه 12 درجه در نظر میگیریم (44 و 56 به ترتیب ورودی و خروجی). در شرایط واقعی کارکرد 3 حالت زیر برای مدارپیش خواهد آمد.

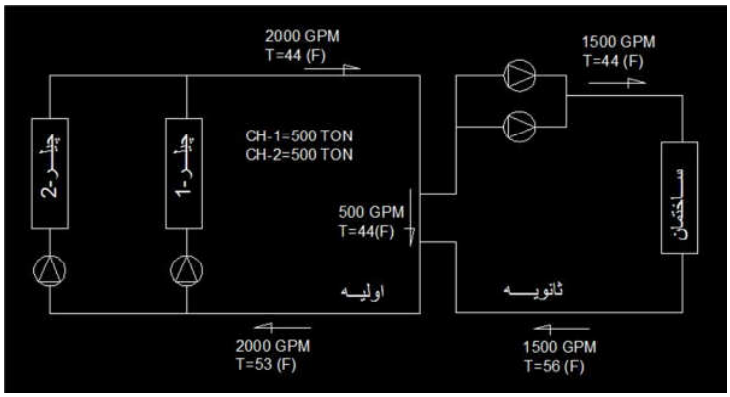
حالت اول : دبی در هر دو مدار برابر است.

فرض کنید که نیازی سرمایشی ساختمان 100% است و براساس آن هر دو چیلر 100٪ زیر بار هستند. دبی مدار اولیه 2000 gpm است. در این حالت تمام دبی در مدار اولیه وارد مدار ثانویه شده، و دبی عبوری از لوله مشترک برابر صفر خواهد بود. در این حالت بار مورد نظر در ساختمان تامین شده و دلتا تی نیز در هر دو مدار 12 باقی میماند.




حالت دوم : دبی در مدار اول بیشتر از مدار دوم است (اینحالت در میانباری اتفاق میافتد).

فرض کنید که نیازی سرمایشی ساختمان از 100٪ به 75٪ رسیده است و نیاز به 1500 GPM دارد. در این حالت دبی در مدار اول برابر 2000 GPMاست اما نیاز ساختمان تنها 1500 GPM است. لذا بخشی از دبی مدار اولیه یعنی 500 GPM وارد مدار ثانویه نشده و از طریق لوله مشترک به مدار اولیه بر میگردد. همچنان دلتا تی 12 درجه در ساختمان برقرار است اما برای چیلر چه اتفاقی میافتد؟




اگر دوباره معادله درجه حرارت را برای نقطه برگشتی به چیلر بنویسیم درجه حرارت برابر 53 درجه خواهد شد بجای 56 درجه فارنهایت. با توجه به اختلاف دمای اختلاط دو سیال بعد از لوله مشترک، توجه داریم که دلتا تی، 9 درجه خواهد بود (بجای 12). بنابراین چیلرها از حالت 100٪ زیر بار به 75٪ زیر بار میروند و مجموع دبی کل مدار اول با کارکرد دو چیلر برابر 1500GPM خواهد شد.

حال فرض کنیم که نیاز سرمایش ساختمان برابر 50٪ است. در اینحالت یک چیلر و یک پمپ مدار اولیه کاملا از مدار خارج میشوند و این یعنی انرژی سیوینگ بالا. بنابراین تنها یک چیلر با 1000 gpm در مدار خواهد بود و نیاز ساختمان را مرتفع میسازد.

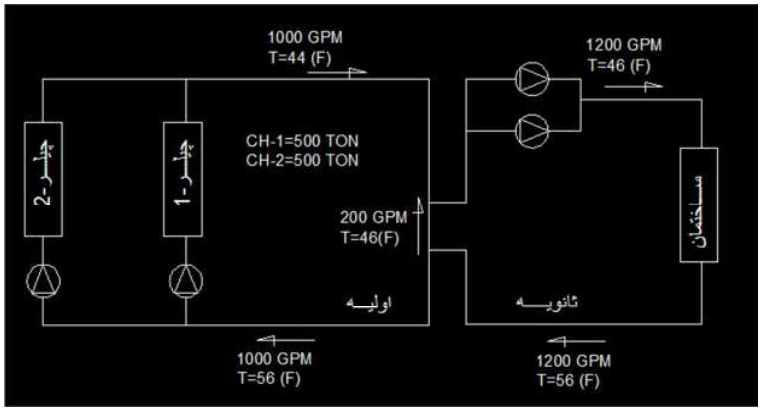
مواردی هم باعث افرایش بی دلیل دبی در مدار ثانویه میشود که به قرار زیر است:

1- کثیف بودن کویل، که در اینحالت برای جبران بار دبی بیشتری از کویل عبور خواهد کرد.
2- ترکیب شیرهای 2 راهه و 3 راهه در مدار ثانویه که غلط است و بایستی تنها از شیرهای دو راهه برای کویلها استفاده شود.
3- حتما مطمئن شویم که شیرهای کنترلی برای کویلهایی که نیاز به باربرداری ندارند، بسته شده باشند.
4- کویلها و شیرها درست انتخاب نشده باشند.

حالت سوم : دبی در مدار اول کمتر از مدار دوم است.

فرض کنیم یکی از چیلرها 100٪ زیر بار بوده و دیگری خاموش است و 1000 gpmدر مدار اولیه در گردش است. فرض کنیم به دلایلی که بالا گفتیم دبی در مدار دوم از مدار اول بیشتر شده است و نیازی سرمایشی در مدار ثانویه به 1200 GPM رسیده است. در این حالت دبی 200 GPM در لوله مشترک معکوس شده و دمای ورودی آب چیلر بداخل ساختمان برابر 46 درجه فارنهایت خواهد بود بجای 44 که ایده آل نیست (براحتی قابل محاسبه). بنابراین به دلتا تی طراحی در داخل ساختمان نخواهیم رسید. این بدترین حالتی است که میتواند ایجاد شود و باید از آن دوری کرد. برای حل این مشکل، چیلر دوم 100٪ وارد مدار

شده و این یعنی اضافه شدن پمپ، برج خنک کن و هدر رفت انرژی در مقدار خیلی زیاد. ولی در عوض به شرایط طراحی یعنی 44 درجه فارنهایت ورودی به کویل میرسیم.
بنابراین دبی عبوری از لوله مشترک به سمت مدار اولیه برمیگردد اما به شدت باعث افت دمای ورودی به چیلر میشود. این حالت باعث ایجاد سندروم دلتا تی پایین برای چیلرها خواهد شد که براساس آن مصرف انرژی بی دلیل بالا رفته و چیلرها از راندمان اصلی خود فاصله میگیرن.

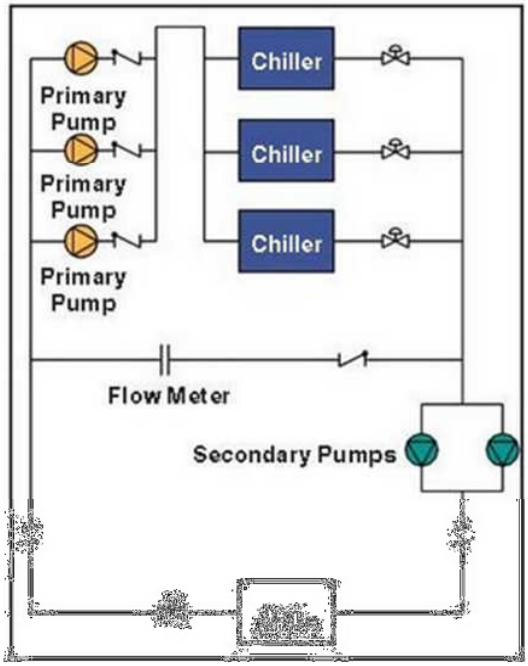



برای حل این مشکل از یک شیر یک طرفه در لوله مشترک استفاده میشود که اجازه عبور سیال را بصورت معکوس ندهد. دوستان توجه داشته باشید که سندروم دلتا تی پایین، مشکل سیستم است که باید برطرف شود نه مشکل سیکل اولیه و ثانویه. این مشکل در سیستمهای سنتی چیلر که در ایران نیز کار میشود به وفور دیده میشود.

خوب اشاره ای هم داشته باشیم به سیستم لوله کشی در مدار اولیه:

این لوله کشی به دوصورت اجرا میشود:

1- اتصال پمپ ها به منیفولد قبل از اتصال به چیلرکه دارای مزایا و معایبی است. تصویر زیر:



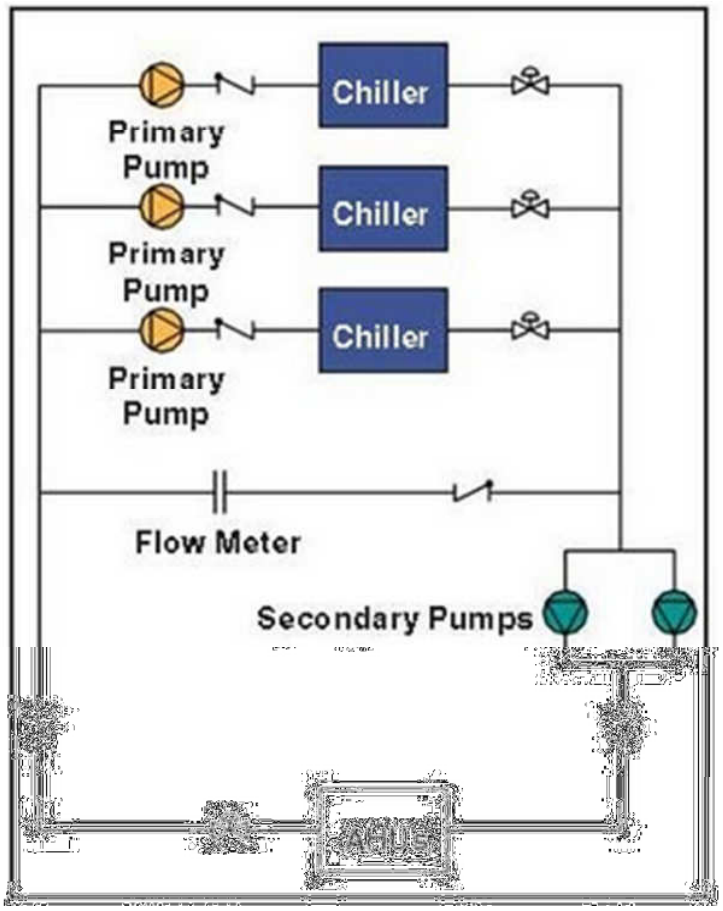

اول: این امکان را میدهد که هر پمپی را برای هر چیلر انتخاب کنیم. برای مثال در زمان تعمیرات اگر پمپی از مدار خارج شده، این مسئله تاثیری روی عملکرد دیگر پمپها و چیلرها نخواهد داشت.

دوم : این امکان را میدهد که بجای یک پمپ از تعداد بیشری پمپ جهت یک چیلر استفاده کرد. مزیت این حالت اینست که اگر دلتا تی از مقدار طراحی کمتر شده باشد، با روشن کردن پمپهای بیشتر، افزایش دبی در مدار اولیه را داریم که با افزایش ظرفیت چیلر مشکل دلتا تی را تاحدودی حل میکند.

**مشکل این چیدمان:**

اینست که اگر تنها یکی از پمپهای در حال کار را از دست بدیم، کل چیلرها را هم از دست خواهیم داد. فرض کنیم 3 چیلر داریم و 3 عدد پمپ. در حال راه اندازی 2 چیلر و 2 پمپ در مدار هستند. اگر یکی از پمپها به هر دلیل از مدار خارج شود، مقدار دبی رسیده به چیلرها کاهش پیدا میکند. این کاهش ناگهانی دبی در چیلرها، باعث تریپ کردن flow switch در اواپراتور شده و باعث میگردد تمام چیلرها از مدار خارج شوند.

نوع دوم : استفاده از یک پمپ به ازای هر چیلر. شکل زیر:



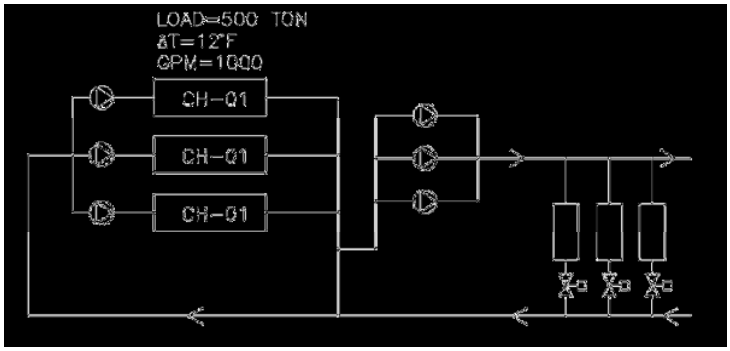

کنترل این سیستم به مراتب آسانتر است به این دلیل که هر پمپ به چیلر خودش متصل است و زمانیکه یک چیلر در مدار شروع بکار کند، پمپ همان چیلر نیز باید شروع به کار کند. پس هر چه ساده تر ، بهتر. مزیت دیگر این روش اینست که میتوان در سیکل اولیه از ظرفیتهای متفاوت استفاده کرد. مثلا دو چیلر با ظرفیت 200 تن و 500 تن بهمراه پمپهای مربوطه. و اگر یکی از پمپهای در حال کار از مدار خارج شود تمام چیلرها را از دست نخواهیم داد.

تنها مشکل این روش اینست که نمیتوانیم پمپ standby در مدار اولیه داشته باشیم. یعنی اگر 3 چیلر و 3 پمپ داریم. هر 3 پمپ یا کار میکنند یا کار نمیکنند و هیچکدام standby نیستند.

در اوایل بحث اشاره کردم که الزاما افت فشار لوله مشترک برای سیستم چیلر نباید صفر باشد. در سیستم کنترلی چیلر ما باید بتوانیم مقدار دبی عبوری از لوله مشترک را نشان دهیم. به این دلیل که این دبی نشانه ای از جریان اضافی در مدار اولیه است که چیلر براساس آن در حال کار است و عاملی خواهد شد که بتوانیم ظرفیت زیر بار چیلر را براساس نیاز ساختمان کاهش دهیم. دقیقا همان مطلبی که در 75٪ یا 50٪ بار اشاره کردیم.

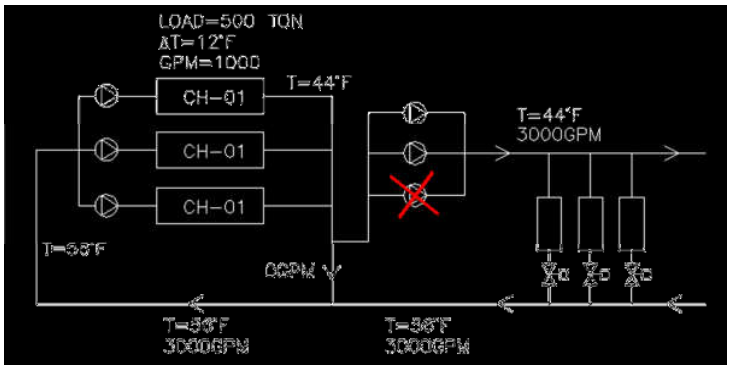
حال به یک مثال عددی دیگر میپردازیم برای تحلیل انرژی مصرفی.

3 عدد چیلر داریم به ظرفیت هرکدام 500 تن با دلتا تی طراحی 12 درجه فارنهایت. در مدار اولیه نیز 3 عدد پمپ دبی ثابت داریم هر کدام به ظرفیت 1000 gpm . در مدار ثانویه 3 عدد پمپ دور متغیر داریم با دبی هرکدام 1500 gpm که یکی از آنها standby است. در ساختمان هم که کویلها را داریم با شیرکنترل دو راهه. میخواهیم مصرف انرژی سیستم را در کارکردهای 100٪،75٪،50٪ و 25٪ مقایسه کنیم. فرض میکنیم به ازای هر تن، kw1.5 مصرف داشته باشیم.




حالت اول – چیلرها 100٪ زیر بار:

در اینحالت 3000 GPM در مدار اولیه داریم و همان مقدار در مدار ثانویه. در مدار اول 3 چیلر و 3 پمپ در حال کار است. در مدار دوم دو پمپ 1500 GPM در حال کار هستند و مقدار دبی در لوله مشترک صفر است. بنابراین داریم:

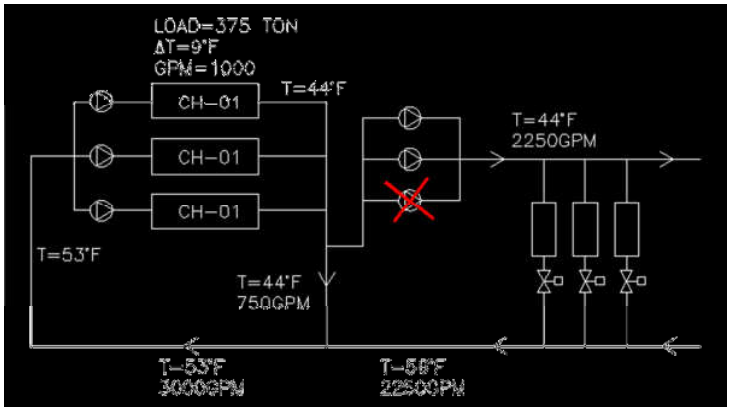



| | هر چیلر | مصرف | کل مدار |
|---|---|---|---|
| بار | 500 تن | 750 KW | 2250 KW |

| | اولیه | ثانویه | لوله مشترک |
|---|---|---|---|
| جریان | 3000 GPM | 3000 GPM | 0 |
| delta t | 12 | 12 | ------- |

حالت دوم – چیلرها 75٪ زیر بار:

در اینحالت GPM 3000 مدار اول ثابت است چون دبی در مدار اولیه باید ثابت باشد. اما دبی متغیر در مدار دوم به 2250GPM تغییر میکند. دلتا تی در مدار اول نیز 9 میشود و چیلر به 75٪ زیر بار منتقل میگردد یعنی 375 تن بجای 500 تن. دبی در لوله مشترک نیز GPM 750 خواهد شد. شکل زیر:

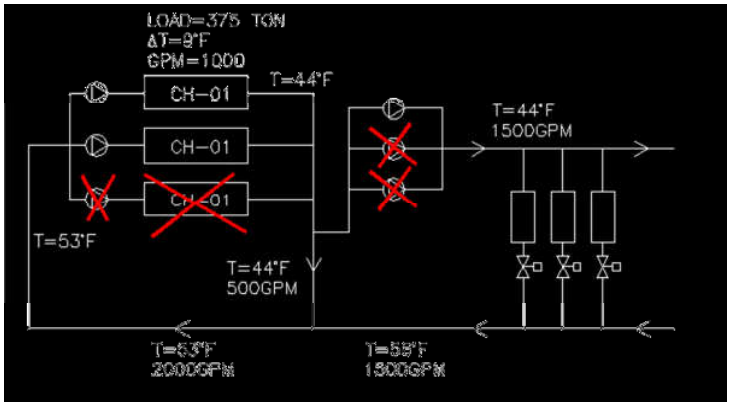



| | هر چیلر | مصرف هر چیلر | کل مدار |
|---|---|---|---|
| بار | 375 تن | 563 KW | 1689 KW |

| | اولیه | ثانویه | لوله مشترک |
|---|---|---|---|
| جریان | 3000 GPM | 2250 GPM | 750 |
| delta t | 9 | 12 | ------- |

حالت سوم – چیلرها 50٪ زیر بار:

در اینحالت دبی متغیر در مدار دوم به 1500 GPM تغییر میکند. برای این تغییر دلتا تی در مدار اول همان 9 باقی میماند و 2 چیلر در همان 75٪ زیر بار کار میکنند.اتفاقی که اینجا رخ میدهد اینست که در مدار اولیه یک چیلر و یک پمپ از مدار خارج میشوند. در مدار ثانویه نیز تنها یک پمپ در حال کار است. دبی در لوله مشترک نیز GPM 500 خواهد شد. شکل زیر:

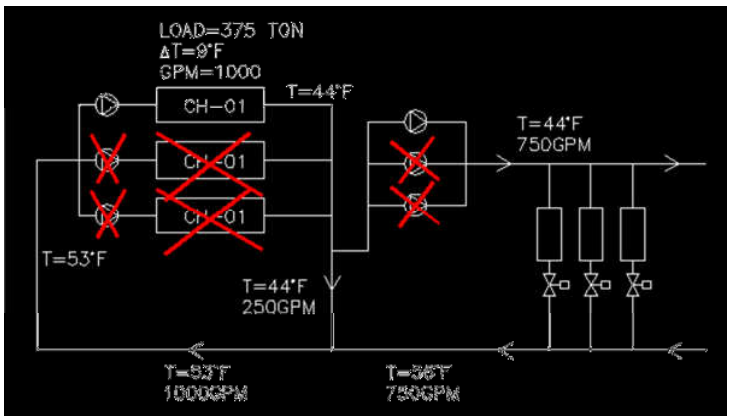


| | هر چیلر | مصرف هر چیلر | کل مدار |
|---|---|---|---|
| بار | 375 تن | 563 KW | 1126 KW |

| | اولیه | ثانویه | لوله مشترک |
|---|---|---|---|
| جریان | 2000 GPM | 1500 GPM | 500 |
| delta t | 9 | 12 | ------- |

حالت چهارم – چیلرها 25٪ زیر بار:

در اینحالت دبی متغیر در مدار دوم به GPM750 تغییر میکند. برای این تغییر دلتا تی در مدار اول همان 9 باقی میماند و تنها یک چیلر در 75٪ زیر بار به کار ادامه میدهد. در اینحالت در مدار اولیه 2 چیلر و 2 پمپ از مدار خارج میشوند. در مدار ثانویه نیز تنها یک پمپ در حال کار است. دبی در لوله مشترک نیز GPM 250 خواهد شد. شکل زیر:




| | هر چیلر | مصرف هر چیلر | کل مدار |
|---|---|---|---|
| بار | 375 تن | 563 KW | 563 KW |

| | اولیه | ثانویه | لوله مشترک |
|---|---|---|---|
| جریان | 1000 GPM | 750 GPM | 250 |
| delta t | 9 | 12 | ------- |

جمع بندی کلی:

در خصوص آنالیز مصرف انرژی نتیجه یک پروژه کارشناسی ارشد دانشگاه NEBRASKA را در اختیار شما قرار میدهم که به مقایسه بین 3 سیستم بالا پرداخته است. جالب است که نویسنده نیز مهندس مکانیک نیست و مهندس معمار است. نتیجه مقایسه به شرح ذیل است: سیستم سوم که امروزه استفاده میشود دارای 64.5٪ انرژی سیوینگ نسبت به سیستم سنتی است که در ایرن کار میشود و همین سیستم 40٪ انرژی سیوینگ نسبت به سیستمهای اولیه و ثانویه دارد.

## 6.1 Conclusion

This thesis presented the design of a pump controller for a variable primary flow configuration pump system. The Best efficiency staging and the loop DP reset were implemented into the pump controller. It was installed and operated in the chiller/boiler plant of WNCC to verify the control effects. Conclusions of the study are listed below:

1) According to the simulation in Chapter 3, the variable primary system has a 40% energy savings when compared to constant primary-variable secondary system; an extra 15% savings is achieved when the pump controller algorithm is implemented.
2) The pump controller potentially provides pump energy savings of 64.5% when compared to constant primary flow system as is verified in WNCC experiment.
3) The system operation with the pump controller is stable.