بهینه سازی مصرف انرژی در کارخانه NGL 700 اهواز به بهره گیری از تکنولوژی پینچ

مسعود فرح بخش،محمد قلمباز*

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: تابستان ۹۵ پذیرش:پائیز ۹۸

چکیده

تکنولوژی پینچ به عنوان ابزاری قوی و موثر جهت آنالیز ترمودینامیکی صنایع فرآیندی و همین طور بهینه سازی شبکه مبدل های حرارتی شناخته شده است. به دو طریق می توان سیستم های حرارتی را با تکنولوژی پینچ طراحی و بهینه سازی نمود. شبیه سازی کارخانه NGL 700 با استفاده از نرم افزار Aspen Hysys V.7.2 براساس داده های موجود در شرایط طراحی و PFD صورت گرفته است. پس از صحت سنجی شبیه سازی صورت گرفته (براساس مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های موجود در PFD)، از فایل شبیه سازی برای شرایط عملیاتی استفاده شده است. یعنی دما، فشار و دبی های شرایط واقعی در شبیه سازی استفاده شده و سپس از فایل شبیه سازی براساس شرایط عملیاتی واقعی، برای تحلیل پینچ استفاده شده است.جهت تحلیل پینچ، از نرم افزار Aspen Energy Analyser، استفاده شده است که در شرایط عملیاتی، تحلیل پینچ صورت گرفته است. به اینگونه که فایل شبیه سازی کارخانه که توسط نرم افزار Aspen Hysys V.2، در شرایط عملیاتی، انجام شده است، در نرم افزار Aspen Energy Analyser، فراخوانی شده و تحلیل پینچ صورت گرفته است.بر اساس نتایج طراحی جدید صورت گرفته مبتنی بر اصول و قواعد پینچ میزان بازیافت انرژی درکارخانه از ۱۸ ٪ به ۴۹/۲ ٪ افزایش می یابد که نشان دهنده ی اهمیت استفاده از تکنولوژی پینچ در طراحی شبکه مبدل های حرارتی در واحدهای صنعتی می باشد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@gmail.com

کلمات کلیدی : انتگراسیون حرارتی، تکنولوژی پینچ، کارخانه NGL 700

۱- مقدمه

هیچ یک از اعمال انسان، بازدهی صد در صد ندارد از این رو استفاده بهینه و ممانعت از هدر رفتن امکانات امری اساسی است این نکته هنگامی اهمیت بیشتری پیدا می کند که موضوع انرژی مطرح شود. منظور از بهینه سازی مصرف انرژی، انتخاب الگوها و اتخاذ و بکارگیری روش ها و سیاست هایی در مصرف درست انرژی است که از نقطه نظر اقتصاد ملی مطلوب باشد و استمرار وجود و دوام انرژی و ادامه حیات و حرکت را تضمین کند. در این چهارچوب تعیین سهم صورت های مختلف انرژی در سبد انرژی هر جامعه با توجه به امکانات دراز مدت ان جامعه، همچنین بکارگیری پربازده ترین شیوه استفاده از انها که متضمن کاهش تخریب منابع انرژی و نیز کاهش تأثیرات سوء ناشی از استفاده ناصحیح از انرژی، بر عوامل دیگر حیات و محیط زیست مدنظر است. این استفاده درست و به جا از انرژی، نه تنها متضمن استمرار حیات و توسعه پایدار جامعه است بلکه منجر به بقاء انرژی برای همگان و نسل های آتی و مانعی برای تولید و گسترش آلودگی های زیست محیطی ناشی از مصرف نادرست انرژی خواهد بود.

تکنولوژی پینچ

تکنولوژی پینچ به عنوان ابزاری قوی و موثر جهت آنالیز ترمودینامیکی صنایع فرآیندی و همین طور بهینه سازی شبکه مبدل های حرارتی شناخته شده است. به دو طریق می توان سیستم های حرارتی را با تکنولوژی پینچ طراحی و بهینه سازی نمود.

- طراحی اصلاحی شبکه حرارتی موجود [۱]

1. Retrofit
2. Grass Roots
3. De- bot trenecking

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]

- طراحی از پایه [۲]

طراحی از پایه در مواردی انجام می پذیرد کـه شـبکه مبـدل هـای حرارتی موجود نیست و باید ساخته شود. در برخی موارد شبکه مبدل هـا وجود دارد اما با اهداف صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش هزینه هـای-اقتصادی و افزایش ظرفیت واحد[۳] نیاز به اصلاح شـبکه هـا وجـود خواهـد داشت .

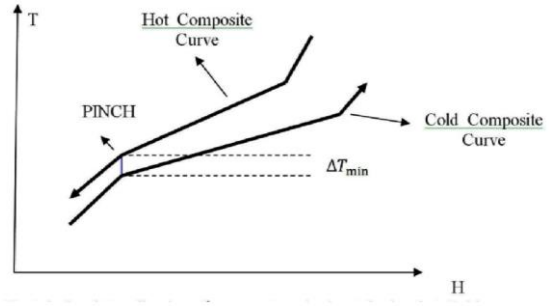
اطلاعات مورد نیاز در طراحی شبکه مدل های حرارتی

برای شروع طراحی مبدل های حرارتی از مهمترین مراحل به دست آوردن داده ها از شمای جریانهای فرایند (Proeess Flow Diagram) می باشد. برای این کار باید مقادیر ظرفیت گرمـائی جریـان هـا و دماهـای ورودی و خروجی هر جریان و ضریب انتقال حرارت را بـه دسـت بیـاوریم. آنالیز پینچ نشانه هایی برای حداقل سازی انرژی لازم مصرفی بدسـت مـی دهد. این نشانه های انرژی بوسیله ابزاری به نام "نمودار مرکب" مشـخص می شوند.

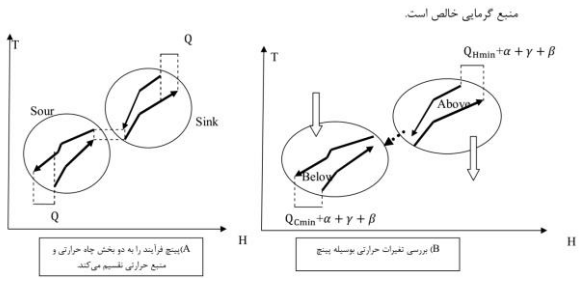
نمودار مرکب شامل پروفایـل دمـا- آنتـالپی(T-H) اسـت کـه هـم انرژی در دسترس فرایند (نمودار مرکب گرم) و هم انرژی مورد نیاز فرایند (نمودار مرکب سرد) را با همدیگر نمایش مـی دهـد. نمـودار مرکـب یـک تصویر از انتقال حرارت متقابل از جریان های سرد و گرم می باشد کـه بـه وسیله آن حداقل انرژی مورد هدف فرایند مشخص می شود. ایـن مهـم از روی هم افتادگی نمودارهـای مرکـب سـرد و گـرم حاصـل مـی شـود. در نزدیکترین نقطه جدایی دو نمودار را می بینیم که به ΔT_{min} معروف مـی باشد. ΔT_{min} حداقل نیروی محرکه دمایی است که مـی توانـد یـک حـد برای حداقل هزینه های انرژی و سرمایه گذاری شبکه مبدل های حرارتـی تعیین کند با توجه به این نمودار می توان بیشترین تبادل حرارتی ممکـن فرایند را مشاهده نمود و هم چنین حداقل حـرارت مـورد نیـاز فراینـد در جریان سرد ($Q_{C\,min}$) و حداقل حرارت مورد نیاز فرایند در جریـان گـرم ($Q_{H\,min}$) قابل محاسبه است [1].

به نقطه ای که در آن ΔT_{min} مشخص شده است، نقطه پیـنچ مـی گویند. به وسیله نقطه پینچ می توان فرایند را بـه دو بخـش تقسـیم کـرد یک بخش قسمت بالای نقطه پیـنچ و بخـش دیگـر قسـمت پـایین نقطـه پینچ.

در این تقسیم بندی مشخص می باشـد. بخـش بـالای نقطـه پیـنچ نیازمند دریافت حرارت می باشد. بنابراین یک چاه گرمـایی خـالص اسـت. بخش پاین نقطه پینچ آماده از دست دادن حـرارت اسـت و بنـابراین یـک منبع گرمایی خالص است.



شکل ۱. استفاده از نمودارهای مرکب سرد و گرم برای یافتن نشانه های انرژی [2]



شکل ۲. نمایش مبانی پینچ [3]

با توجه به قسمت B میزان حرارت منتقل شده از بالای نقطه پینچ به پایین نقطه پینچ برابر با α می باشد. قبل از این انتقال حرارت، از موازنه حرارت بالای نقطه پینچ میزان حرارت $Q_{H\,min}$ را بدست آوردیم. حال با موازنه مجدد می بینیم میزان حرارت α نیز بر آن اضافه شده است. در پایین نقطه پینچ نیز میزان حرارت α بر حرارت اضافی موجود در پایین نقطه پینچ اضافه شده است.

با توجه به مقدار γ حرارت از دست داده شـده بـه محـیط در بـالای نقطه پینچ است و مقدار β حرارت گرفته شـده از محـیط در پـایین نقطـه پینچ است. به حرارت مورد نیاز بالای نقطه پینچ میزان γ اضافه می شـود و هم چنین به میزان حرارت اضافی پایین پینچ نیز این میزان حرارت اضافه می شود.

به طور مشابه حرارت خارجی گرفته شده در پایین نقطـه پیـنچ بـه میزان β حرارت های مورد نیاز سرد و گرم را به همین مقدار افـزایش مـی دهد [4-5].

با توجه به مسائل عنوان شده در مورد پینچ باید سـه قـانون زیـر را رعایت کرد تا به حداقل انرژی مورد هدف رسید.

- هیچ انتقال حرارتی از نقطه پینچ نباید صورت بگیرد.
- در بالای نقطه پینچ نباید تبادل حرارت از سیستم به محیط صورت پذیرد.

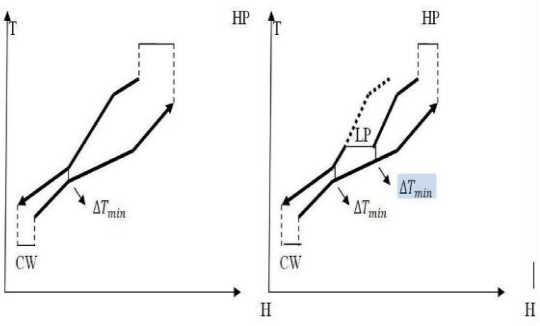
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]

- در پایین نقطه پینچ نباید تبادل حرارت از محیط به سیستم صورت پذیرد [6].

منابع تامین انرژی

انرژی مورد نیاز یک فرایند در سطوح مختلف انرژی تامین می شود. مثل سطح بخار، سطوح سرمایشی، گاز داغ شده از کوره، روغن داغ و ... . هدف عمومی هر واحدی کم نمودن سطوح انرژی پر هزینه و افزایش سطوح انرژی ارزان است. برای مثال در جایی که بخار با فشار پایین برای گرمایش کافی است، نباید از بخار با فشار بالا استفاده نمود و هزینه اضافی به واحد تحمیل نمود یا از سیستم خنک سازی گاز به جای آب خنک استفاده نمود.

نمودار مرکب یک هدف گذاری کلی انجام می دهد و نمی توان از آن به طور واضح میزان نیازمندی حرارتی را در سطوح مختلف انرژی بدست آورد این مساله را می توان در ۰دید.

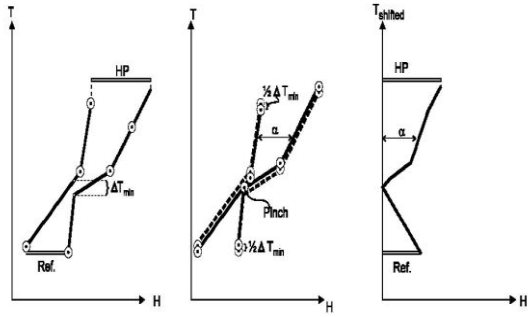


شکل ۳. استفاده از نمودار مرکب برای هدف گذاری سطوح انرژی [7]

با توجه نمودار مرکب در می بینیم که در دو سطح، انرژی مورد نیاز سیستم تامین شده است، یکی بخار فشار بالا و یکی آب خنک کن. حال در شکل فوق می بینیم که یک نمودار مرکب جدید ساخته شده است که در آن مقداری از حرارت بالای نقطه پینچ توسط بخار فشار پایین تامین شده است. در صورتی که این حرارت در نمودار اول در فشار HP تامین شده بود. بیشترین میزان استفاده از بخار LP به جای بخار HP را می توان با اختلاف دمای ΔT_{min} بدست آورد. زیرا حداقل فاصله در نمودار مرکب بین جریان سرد و گرم است. برای استفاده از سطوح مختلف انرژی باید مطابق همین روش عمل شود. بعد از استفاده از هر سطح انرژی جدید، نمودار مرکب متفاوت از قبل شده و اگر چندین پیشنهاد برای استفاده از سطوح مختلف انرژی داشته باشیم، با مساله بسیار پیچیده ای روبرو خواهیم بود، لذا استفاده از نمودار مرکب برای حل چنین مساله ای انتخاب راه حلی دشوار است[7]. نمودار مرکب گراند[4] راه حل مناسبی برای حل این مساله می باشد.

نمودار مرکب گراند

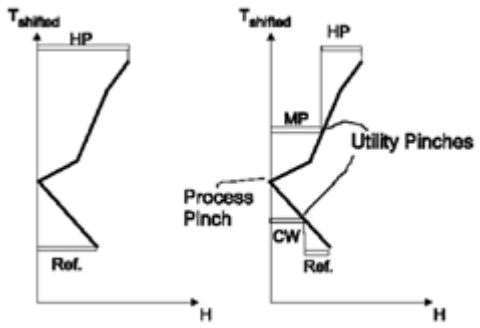
نمودار مرکب گراند برای هدف گذاری سطوح انرژی استفاده می شود. در ابتدا نمودار مرکب سرد در محور عمودی به میزان $1/2\Delta T_{min}$ بالا می آوریم و نمودار مرکب گرم را به همین میزان پایین می آوریم. با این جابجایی دما در جریان های فرایند و سطوح انرژی مطمئن خواهیم بود که در نمودار مرکب جمع حداقل اختلاف دما ΔT_{min} بین جریان های فرایند و سطوح انرژی باقی خواهد ماند. با این جابجایی دما نمودارهای مرکب به هم خواهند رسید و نمودار مرکب جمع از اختلاف آنتالپی نمودارهای مرکب جدید بدست خواهد آمد. نقطه ای که در آن نمودار مرکب گراند محور عمودی را قطع می کند نقطه پینچ می باشد که انتالپی آن صفر است. دهانه های باز در بالا و پایین این نمودار به ترتیب نشان دهنده حداقل سرویس های جانبی گرم و سرد مورد نیاز فرایند می‌باشند[8].



شکل ۴. ایجاد نمودار مرکب گراند [2]

هدف گذاری سطوح انرژی با استفاده از نمودار مرکب گراند

نمودار مرکب گراند یک ابزار مناسب برای هدف گذاری سطوح انرژی است. این مساله در شکل ۵ نشان داده شده است.



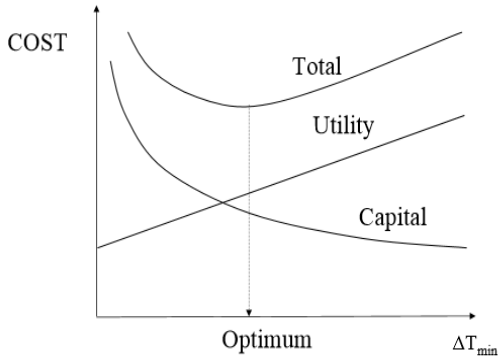
شکل ۵. استفاده از نمودار مرکب گراند برای هدف گذاری سطوح انرژی [7]

4. Grand Compsite Curve

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]

در شکل ۵ موقعیت بخار HP مورد نیاز برای گرمایش و سیستم خنک کن برای سرمایش فرایند نشان داده شده است. برای اینکه هزینه انرژی کاهش پیدا کند، از بخارMP (بخار در فشار متوسط) و آب خنک کن استفاده می کنیم. در شکل ۵ می بینیم که در دمای بخارMP یک خط از محور عمودی کشیده شده است تا نمودار مرکب جمع را قطع کند. این خط معرف میزان بخارMP مورد نیاز است. مابقی انرژی مورد نیاز باید توسط بخارHP تامین شود. به همین صورت میزان آب خنک مصرفی مشخص می شود. نقطه برخورد خط سطحMP وCW با نمودار مرکب جمع به نقاط پینچ های سرویس های جانبی [5] معروفند [9].

همان طور که در بالا توضیح داده شد، به کمک نمودارهای مرکب و مرکب گراند می توان هزینه های کلی سیستم شامل هزینه های عملیاتی تامین انرژی و هزینه های تجهیزات شبکه را هدف گذاری نمود [8]. بدین ترتیب که با افزایش (ΔT_{min}) نیروی محرکه دمایی برای مبدلها افزایش یافته و بنابراین مساحت لازم کاهش پیدا می کند و در نتیجه هزینه سرمایه گذاری کاهش می یابد، در حالی که حداقل منابع خارجی لازم برای سرد و گرم کردن جریان ها افزایش می یابد. بنابراین در یک (ΔT_{min}) مشخص، مقدار هزینه کلی به حداقل مقدار خود می رسد که این (ΔT_{min}) نقطه آغاز طراحی شبکه مبدلهای حرارتی می باشد. (شکل ۶).



شکل ۶. تغییرات هزینه های شبکه مبدل های حرارتی با حداقل نیروی محرکه دمایی [8]

قوانین طراحی تکنولوژی پینچ در به دست آوردن حداکثر بازیافت انرژی

برای طراحی قبل از هر چیز نیاز به استخراج اطلاعات می باشد که در بخشهای قبلی توضیح داده شده است. پس از مشخص کردن جریانها و مشخصات مربوط به هر جریان و مشخص شدن معادله قیمت مربوط به مبدل ها و قیمتهای منابع خارجی می توان $\Delta T_{min,opt}$ را به دست آورد و بعد با تعیین نقطه پینچ گرم و سرد، شبکه جریان های زیرنقطه پینچ و بالای نقطه پینچ را تعیین نمود.

رعایت قوانین زیر در هنگام طراحی، از موارد مهم تکنولوژی پینچ می باشد:

هیچ انرژی را نمی توان از بالا به پایین پینچ عبور داد زیرا دو بار جریمه پرداخت خواهد شد یعنی بیشتر از نیاز، گرما افزوده خواهد شد.

۱) بالای نقطه پینچ نمی توان از منابع خارجی سرد استفاده نمود زیرا استفاده از منابع خارجی سرد در بالای نقطه پینچ بدین معناست که از سیستمی که حرارت بیشتری دارد، حرارت دریافت می شود به همین دلیل همان مقدار گرما باید افزوده شود.

۲) پایین نقطه پینچ نمی توان از منابع خارجی گرم استفاده نمود زیرا بدین معناست که در جایی که مازاد حرارت داریم باز هم گرمایش انجام می شود و نیاز به عملیات سرمایشی اضافی دارد.

۳) در زیر نقطه پینچ مجموع انرژی منابع سرد استفاده شده نباید ازQC_{min} بیشتر باشد و در بالای نقطه پینچ مجموع انرژی منابع گرم مورد استفاده نباید ازQH_{min} بیشتر باشد.

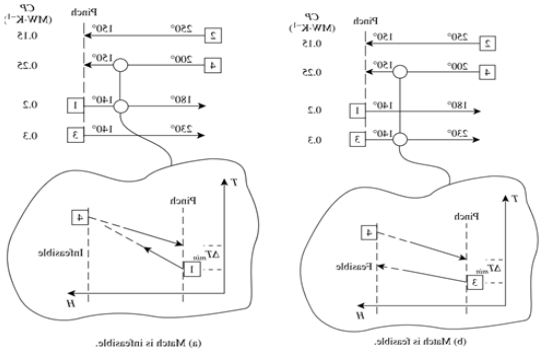
قواعد طراحی

طراحی را از نقطه پینچ شروع می کنیم و جلو می رویم و یک جریان گرم و سرد را مقابل هم قرار می دهیم و داخل یک مبدل می فرستیم.

برای هر pinch match ای که انجام می دهیم باید شدت ظرفیت حرارتی جریان خروجی از نقطه پینچ بزرگتر یا مساوی شدت ظرفیت حرارتی جریان ورودی به نقطه پینچ باشد($CP_{out} \geq CP_{in}$). منظور ازpinch match مبدل حرارتی ای می باشد که هر دو دمای یک سمت آن دقیقا دماهای نقطه پینچ باشد به عنوان مثال اگر طراحی در بالای نقطه پینچ انجام می شود باید هر دو دمای سمت چپ pinch match دماهای نقطه پینچ باشد و بین این مبدل و نقطه پینچ هیچ مبدل حرارتی دیگری قرار نگرفته باشد. برای توجیه لازمه برقراری قانون ($CP_{out} \geq CP_{in}$) به شکل۷ توجه شود. در بالای پینچ جریان گرم ورودی و جریان سرد خروجی و در پایین پینچ برعکس است.

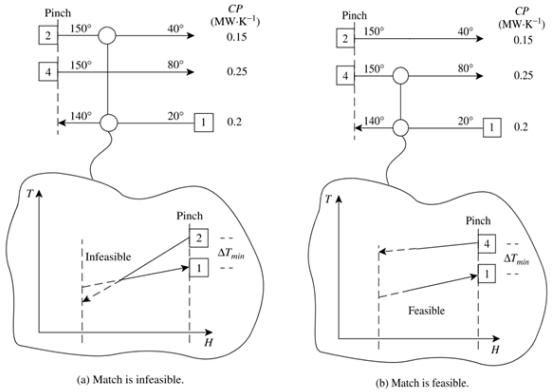
5. Utility Pinches

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]



شکل ۷. شرایط Pinch match در بالای پینچ [10]

در شکل ۷ قسمتa یـک Pinch Match را در بـالای Pinch نشـان داده است که در آن CP_{out} برابر با۰/۲ و CP_{in} برابـر بـا ۰/۲۵مـی باشـد حال نمودار دما آنتالپی(T-H) ایـن دو جریـان گـرم و سـرد را رسـم مـی کنیم همان طور که مشـاهده مـی شـودΔT سـمت راسـت مبـدل کمتـر ازΔT_{min} شده است وΔT_{min} را نقض کرده است. چون شیب نمـودار $\frac{1}{CP}$ است و $CP_{in} \geq CP_{out}$ است پس شیب جریان ورودی کمتـر از شـیب جریان خروجی می شود و خطوط دو جریان از بـالا بـه هـم نزدیـک مـی شوند پس این Pinch Match غیرمنطقی[6] است.اما در Pinch Match نشان داده شده در شکل ۷ قسمتb، CP_{in} برابر با ۰/۲۵ وCP_{out} برابر با ۰/۳ می باشد پس شیب جریان ورودی بـه پیـنچ بیشـتر از شـیب جریـان خروجی از پینچ شده وΔT سمت راسـت مبـدل بیشـتر از ΔT_{min} شـده است پس این Pinch Match منطقی[7] است. شکل ۸ همین مفهوم را بـه طور مشابه در پایین پینچ نشان می دهد.



شکل ۸. شرایط Pinch Match در پایین پینچ [10]

۱) با هر مبدلی که بین یک جریان سرد و گرم می بنـدیم انـرژی لازم برای تغییر دمای یکی از جریان ها باید تـامین شـود و از جریان های شبکه مبدل ها حذف شود تـا بـه حـداقل تعـداد مبدل ها برسیم.

۲) انتخابهایی که با اعمال قانون $CP_{in} \leq CP_{out}$ در طراحـی جریانهای خروجی از پینچ وجود دارد در زیـر شـرح داده مـی شود :

- ✓ قرار دادن Pinch Match اگر $CP_{in} \leq CP_{out}$
- ✓ قرار دادن مبدل حرارتی بین جریان خروجی و جریان ورودی که از نقطه پینچ فاصله دارد یعنی بین این مبدل و نقطه ی پینچ یک Pinch Match باشد.
- ✓ اگر طراحی جریان خروجی بالای پینچ مدنظر باشد میتوان از تاسیسات جانبی گرمایشی و اگر طراحی جریان خروجی پایین پینچ مدنظر باشد می توان از تاسیسات جانبی سرمایشی استفاده نمود.

با توجه به توضیحات بالا جریان های خروجی از پینچ به سادگی قابل طراحی می باشند.

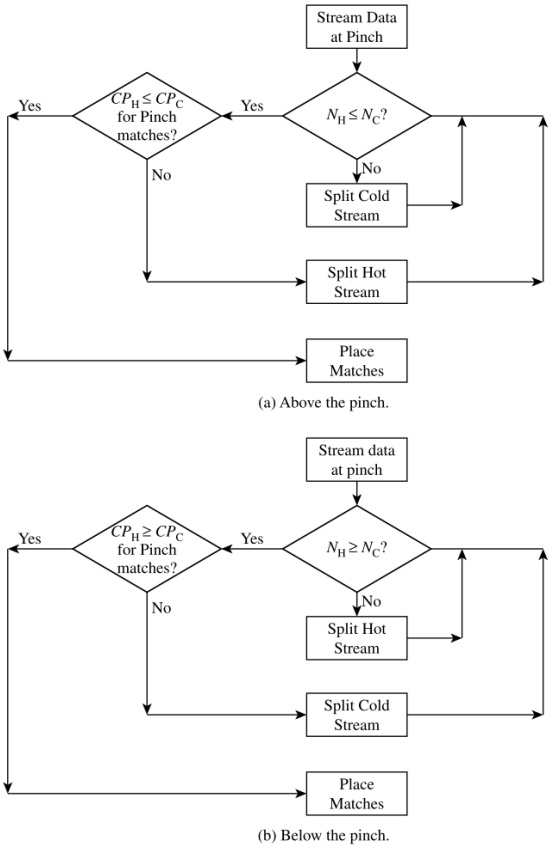
انتخابهایی که در طراحی جریانهای ورودی به پینچ با اعمال قانون $CP_{in} \leq CP_{out}$ وجود دارد تنها یک مورد است و آن قرار دادن Pinch Matchاگر $CP_{in} \leq CP_{out}$ می باشد. جریانی که از پینچ فاصله دارد، جریان متناظر ورودی به پینچ نمی تواند باشد چونΔT_{min} را نقض می کند. تاسیسات جانبی نیز به دلیل اینکه باعث انتقال حرارت از نقطه ی پینچ می شوند نمی توانند به عنوان جریان متناظر انتخاب شوند. با توجه به توضیحات بیان شده مشخص می شود، طراحی جریان های ورودی به پینچ دشوار می باشد.

با استفاده از این قواعد می توان شبکه مبدل های زیـر پیـنچ و بـالای پینچ را به طور جداگانه طراحی نمود و شبکه مبدل های کلی را به دسـت آورد.

در مواردی نمی توان زوج جریان های ورودی و خروجـی بـه نقطـه ی پینچ را به شکل مناسب اختیار نمود. در چنین شرایطی باید جریـان را بـه دو یا چند زیر شاخه تقسیم نمود. البته اضافه نمودن زیر شاخه بـه معنـای پیچیده تر شدن شبکه است و تا حد امکان باید از آن جلـوگیری گـردد. ۰ الگوریتم تقسیم کردن جریان ها را در بالا و پایین نقطه پیـنچ نشـان مـی دهد.

6. Infeasible
7. Feasible

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]



شکل ۹. الگوریتم تقسیم کردن جریان ها [11]

مطالعه موردی

در این مطالعه به بررسی مصرف انـرژی در کارخانـه NGL700 اهـواز بـا بهره گیری از تکنولوژی پینچ پرداخته شده است. در ابتدا مقـادیر مصـرف انرژی در حالـت کنـونی کارخانـه و پـس از آن مقـادیر مصـرف انـرژی در صورت بکارگیری آنالیز پینچ در کارخانـه ارائـه گردیـده اسـت. بـرای ایـن منظور ابتدا تمامی جریان ها و تأسیسات کارخانـه در نـرم افـزار Aspen Hysys V.7.2 شبیه سازی گردیده است و سپس ایـن شـبیه سـازی در نرم افزار Aspen Energy Analyser فراخوانی شده اسـت کـه نتـایج حاصل از آن در جدول ۱ ارائه گردیده است. سپس با بهره گیـری از اصـول تکنولوژی پینچ و بررسی جریان هـای کارخانـه در شـرایط عملیـاتی و بـا فرض ΔT_{min} = 10 ℃ نتایج ارائه شده در جدول ۲ به عنـوان حالـت بهینه بازیافت انرژی در کارخانه حاصل می گردد

پارامتر	واحد	مقدار
انرژی بازیافتی	MW	۲/۸۲
تأسیسات گرم مورد نیاز	MW	۲/۷۲
تأسیسات سرد مورد نیاز	MW	۱۰/۱۷

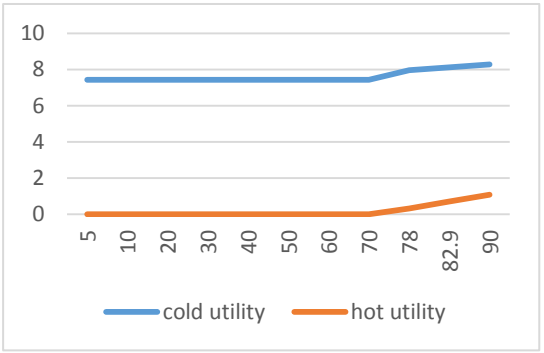
جدول ۱

پارامتر	واحد	مقدار
ΔT_{min}	^{o}C	۱۰
انرژی بازیافتی	MW	۷/۷۳
تأسیسات گرم مورد نیاز	MW	۰
تأسیسات سرد مورد نیاز	MW	۷/۴۳

جدول ۲

بررسی نتایج

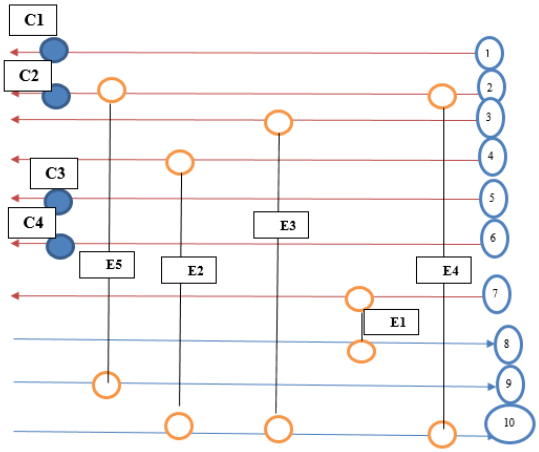
نتایج حاصله نشان می دهد که در حالت بهینـه میـزان تأسیسـات گرم مورد نیاز صفر می باشد یا به عبارت دیگر در حالت بهینـه نیـازی بـه منبع گرم نداشته و گرمای مورد نیـاز را میتـوان از خـود جریـان هـا و در مبدل های حرارتی بدست آورد. به چنین مسائلی که در آن هـا تنهـا یـک منبع انرژی مورد نیاز می باشد Threshold Problems گفته می شود. در این مسائل نیز مانند سایر مسائل در مقادیر بالای ΔT میـزان بازیافـت انرژی کم می باشد و با کاهش ΔT میزان بازیافت انرژی افزایش مـی یابـد و به تبع آن از مقادیر منابع گرم و سرد انرژی کاسته می شود تا جایی کـه مقدار یکی از منابع مورد نیاز به صفر برسـد. مقـدار ΔT کـه در آن مقـدار یکی از منابع صفر می شود به $\Delta T_{Threshold}$ معروف است. حال اگـر مقـدار ΔT را مقادیر کمتر از $\Delta T_{Threshold}$ انتخاب کنیم میزان بازیافـت انـرژی و مقادیر منابع مـورد نیـاز تغییـری نخواهنـد کـرد. مقـدار $\Delta T_{Threshold}$ در مسئله ی پیش رو حدود ۷۲ ^{o}C می باشد و انتخاب هر مقدار ΔT کمتـر از $\Delta T_{Threshold}$ تغییری در مقـادیر بازیافـت انـرژی و منـابع گـرم و سـرد ندارد. شکل ۵-۴ نحوه محاسـبه ی $\Delta T_{Threshold}$ را بـا اسـتفاده از نمـودار نشـــــــــــــــان مـــــــــــــــی دهـــــــــــــــد.



نمودار ۱.

هم چنین شکل زیر طراحی بهینه شبکه مبدل های حرارتی کارخانه را نشان می دهد.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]



شکل ۱۰. شبکه مبدل های حرارتی طراحی شده

در شکل بالا تعداد ۷ جریان گرم و ۳ جریان سرد دیده می شود کـه بـا ۵ عدد مبدل حرارتی و ۴ عدد کولر به دماهای هدف خود رسیده اند. مبـدل *E1* همان مبدلی است که در شبکه مبـدل کنـونی کارخانـه موجـود مـی باشد. منبـع گرمـایی گـرم نیـز کـاملا از سیسـتم حـذف گردیـده اسـت. مشخصات مبدل ها و کولر ها و روندی که هـر جریـان بـرای رسـیدن بـه دمای هدف خود باید طی کند در زیر شرح داده شده و پس از آن به طـور مختصردر جداول ۳ تا ۵ شرح داده شده است.

مبدل *E1* : این مبدل بین دو جریان ۷ و ۸ قرار گرفتـه و بـدون تغییـر از شبکه ی مبدل های حرارتی قبلی به حالت بهینه نیز منتقل گردیـده و بـا میزان انتقال حرارت *KW* ۱۱۴۱/۴۱ تمامی حرارت اضافی جریان ۷ را بـه جریان ۸ منتقل می نماید تا هر دو جریان به دمای هدف خود برسند.

مبدل *E2* : این مبدل بین دو جریان ۴ و ۱۰ واقع گردیده و با بار حرارتی *KW* ۱۱۷۵/۲ جریان ۴ را به دمای هدف خود می رساند.

مبدل *E3* : این مبدل بین دو جریان ۳ و ۱۰ قرار گرفته و با بار حرارتـی *KW* ۱۰۴۱/۶ جریان ۳ را به دمای هدف خود می رساند.

مبدل *E4* : این مبدل بین دو جریان ۲ و ۱۰ واقع گردیده و حرارت *KW* ۳۵۴/۰۳ را از جریان ۲ گرفته و به جریان ۱۰ منتقـل مـی نمایـد. جریـان ۱۰ که پیش از این از طریق مبدل های *E2* و *E3* حرارت دریافت کرده با دریافت حرارت از مبدل *E10* به دمای هدف خود می رسد.

مبدل *E5* : این مبدل بـین دو جریـان ۲ و ۹ قـرار دارد و بـا تبـادل نـرخ گرمای *KW* ۱۵۱/۷۵ جریان ۹ را به دمای هدف خود می رسـاند. جریـان ۲ که پیش از این مقـداری حـرارت در مبـدل *E4* از دسـت داده مـابقی حرارت خود را در کولر از دست خواهـد داد و بـه دمـای هـدف خـود مـی رسد.

کولر *C1* : این کولر روی جریان ۱ قـرار دارد و بـا گـرفتن *KW* ۱۰۳۷/۵ گرما از این جریان آن را به دمای به دمای هدف خود می رساند.

کولر *C2* : این کولر روی جریان ۲ با بار *KW* ۴۰۴/۴۹ قـرار دارد. جریـان ۲ که پیش از این در مبدل های *E4* و *E5* مقداری گرما از دسـت داده، مابقی گرمای خود را در این کولر از دست خواهد داد.

کولر *C3* : این کولر روی جریان ۵ قرار دارد و سـرمای *KW* ۳۳۷۰/۸۴ را فراهم می نماید.

کولر *C4* : این کولر روی جریان ۶ قرار دارد و سـرمای *KW* ۲۶۳۲/۷۷ را فراهم می نماید.

نام مبدل	*E1*	*E2*	*E3*	*E4*	*E5*
میزان تبادل حرارت (*KW*)	۱۱٤۱/۱۱	۱۱۷۵/۲	۱۰٤۱/٦	۳٥٤/۰۳	۱٥۱/۷٥
جریان های مرتبط	۷–۸	٤–۱۰	۳–۱۰	۲–۱۰	۲–۹

جدول ۳

نام کولر	C1	C2	C3	C4
میزان تبادل حرارت (*KW*)	۱۰۳۷/٥	٤۰٤/٤۹	۳۳۷۰/۸٤	۲٦۳۲/۷۷
جریان مرتبط	۱	۲	٥	٦

جدول ۴

شماره جریان	نوع جریان	حرارت مورد نیاز(*KW*)	تعداد مبدل	تعداد منبع	حرارت مبادله شده در مبدل (*KW*)	تبادل حرارت با منبع (*KW*)
۱	گرم	۱۰۳۷/٥	۰	۱	۰	۱۰۳۷/٥
۲	گرم	۹۱۰/۲۷	۲	۱	٥۰٥/۷۸	٤۰٤/٤۹
۳	گرم	۱۰٤۱/٦	۱	۰	۱۰٤۱/٦	۰
٤	گرم	۱۱۷٥/۲	۱	۰	۱۱۷٥/۲	۰
٥	گرم	۳۳۷۰/۸٤	۰	۱	۰	۳۳۷۰/۸٤
٦	گرم	۲٦۳۲/۷۷	۰	۱	۰	۲٦۳۲/۷۷
۷	گرم	۱۱٤۱/۱۱	۱	۰	۱۱٤۱/۱۱	۰
۸	سرد	۱۱٤۱/۱۱	۱	۰	۱۱٤۱/۱۱	۰
۹	سرد	۱٥۱/۷٥	۱	۰	۱٥۱/۷٥	۰
۱۰	سرد	۲٥۷۰/۸۳	۳	۰	۲٥۷۰/۸۳	۰

جدول ۵

جمع بندی

شبکه ی مبدل های حرارتی در کارخانه NGL 700 پیش از ایـن در حالت بهینه نبود. به همین منظور شبکه مبـدل هـای حرارتـی جدیـد مبتنی بر اصول تکنولوژی پینچ طراحی گردید. پیش از انجام بهینه سازی ۲/۸۲ MW از کل انرژی مورد نیاز کارخانه از طریق بازیافت انرژی تـأمین می گردید (حدود ۱۸ ٪) که در صورت پیاده سـازی طـرح فـوق مصـرف کارخانه از ۱۲/۸۹ MW به ۷/۴۳ MW خواهد رسـید. هـم چنـین ایـن موضوع که میزان بازیافت انرژی در کارخانه پـس از بهینـه سـازی MW

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]

۷/۷۳ خواهد بود، نشان می دهد که ۴۹/۲ ٪ از انرژی مورد نیاز کارخانـه از طریق بازیافت تأمین خواهد شد که حدود ۳۱ ٪ نسبت به حالـت پـیش از بهینه سازی افزایش خواهد داشت و ایـن خـود نشـان دهنـده ی اهمیـت بکارگیری تکنولوژی پینچ در طراحی شبکه ی مبدل های حرارتـی اسـت. با توجه به اینکه $\Delta T_{Threshold}$ مقدار بالایی می باشـد مـی تـوان از مبـدل هایی با اختلاف دمایی بالا (زیـر دمـای $\Delta T_{Threshold}$) و در نتیجـه سـطح حرارتی کمتر بهره برد و این خود به معنای هزینه های اولیه کمتـر جهـت اصلاح می باشد.کاهش بار حرارتی که در پریچیلر و چیلر مورد نیـاز اسـت با استفاده از مبدل های حرارتی امکان پذیر نمی باشد. زیرا بازه ی دمـایی آن ها پایین است و با در نظر گرفتن دمای جریـان هـای گـرم موجـود در کارخانه نمیتوان بین آن ها مبدل قرار داد. در نتیجـه مقـدار بـار حرارتـی سیکل تبرید آن ها در فرآیند بهینه سازی کارخانه تغییر نمی کند. اما بـار کندانسور کـه در شـرایط عملیـاتی کارخانـه ۴/۱۶۴ MW مـی باشـد بـا بکارگیری مبدل های حرارتی به ۱/۴۴۱MW معادل ۶۵/۴۱٪ مقدار اولیه کاهش می یابد. تعداد مبدل های حرارتـی کارخانـه از ۱ عـدد بـه ۵ عـدد افزایش می یابد. جهت کسب اطمینـان از صـحت نتـایج، محاسـبات را بـا مقادیر مختلف ΔT که کمتر از $\Delta T_{Threshold}$ بوده انجام داده و هر بـار بـه عدد صفر برای منبع گرم و ۷/۴۳ MW برای منبع سرد دست یافتیم که نشان از صحیح بودن محاسبات دارد. (در زیر دمای $\Delta T_{Threshold}$ بـه ازای مقادیر مختلف ΔT مقدار ثابتی برای منابع گرم و سرد به دست می آید).

مراجع

1) Takamatsu, T. Nakaiwa, M. Huang, K. (1999).“Simulation oriented development of a new heat.
2) Mafi, M., Mousavi Naeynian, S.M., Amidpour, M., 2013. Exergy analysis of multistage distillation columns in NGL plants, international journal of refrigeration. 32, 279 – 294.
3) Linnhoff, B. 1998. “Introduction to Pinch Technology”, Linhoff March Northwich, cheshire, CW9 7UZ, England, 7-12.
4) Kemp, I.C., 2007. Pinch analysis and process integration, 2nd edition, Elsevier.
5) Linnhoff, B. 1998. “SuperTarget” pinch analysis software suite, available from Linnhoff March Ltd. UK.
6) Smit, R., and P.S. jones, 1990. “The Optimal Design of Integration Evaporation Systems”, Heat Recov. Sys. CHP, vol. 10, no. 4, pp. 341-368
7) Linhoff, B. H Dunford, and R. smith, 1993. “Heat Integration of Distillation Columns into Overall Processes”, Chem.Eng.Sc., vol. 38, no. 8, pp. 1175-1188.
8) Polley, G.T., Panjeshahi, M.H. Interfacing Heat Exchanger Network Synthesis and Detailed Heat Exchanger Design. Transactions of the Institute of Chemical Engineers, 69, .2015
9) Badr Abdoullah Al-Riyami, Jiri Klemes, Simon Perry, "Heat Integration Retrofi Analysis of a Heat Exchanger Network of a Fluid Catalytic cracking Plant", Applied Thermal Engineering 2, 2015 487
10) Glinos, K. Malone, M. F. (2012). “Complex column alternatives in distillation systems”, Chemical.
11) Khalifa, M. Emtir, M. (2014). “Rigorous optimization of heat-integrated and Petlyuk column distillation configurations based on feed conditions”,Clean Technology Environment Policy, 11 pp 107–113, (2014). “Energy saving in multicomponent separation using an internally heat-integrated distillation column

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.2.1.0]