اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با در نظر گرفتن محدودیتهای افت فشار ۲ـطراحی

دکتر محمدحسن پنجه‌شاهی
گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران
مهندس مهران غفوریان صدیق
گروه مهندسی شیمی ، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی ، مشهد

چکیده

اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی بمنظور رفع گلوگاههای حاصل از افزایش ظرفیت و یا اصلاح فرایند به عنوان یکی از مهمترین مباحث مهندسی سیستمهای فرایند در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در مقاله شماره ۱، روش جدیدی بمنظور هدف‌گذاری و برآورد میزان سطح مورد نیاز جهت رفع گلوگاههای حرارتی و دینامیکی شبکه مبدلهای حرارتی بطور یکجا و با حفظ تطابق کامل با مبانی طراحی تفصیلی مبدلهای حرارتی ارائه گردید. از آنجا که کلیه محدودیتهای دینامیکی سیستم پیش از مرحله سنتز، بهینه‌سازی و طراحی تفصیلی شبکه بطور کامل در نظر گرفته شده است، اطمینان کافی از عملکرد صحیح پمپها و کمپرسورها پس از اصلاح شبکه حاصل شده و نیازی به تعویض این دستگاهها وجود ندارد. در این مقاله با بکارگیری ابزار و روشهای ۳موجود و نیز بکارگیری تکنیکهای مناسب برای طراحی اصلاحی شبکه‌ها به منظور رفع گلوگاه، شبکه هدف‌گذاری شده در مقاله شماره ۱ سنتز و طراحی تفصیلی شده و در انتها نتایج حاصل از طراحی با نتایج هدف‌گذاری مقایسه و کارایی و دقت روش هدف‌گذاری پیشنهاد شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

با در دست داشتن نتایج هدف‌گذاری نباید تصور نمود که پس از این بسادگی و به عنوان مثال با روش بازرسی شبکه موجود، [1] ، می‌توان اقدام به اصلاح شبکه برای رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده نمود. آنچه در این مرحله اهمیت دارد وجود یک روش طراحی است که بتواند دستیابی به هدفهای تعیین شده از لحاظ انرژی، سطح و نیز محدودیتهای هیدرودینامیکی را تأمین نماید. روشی که در وهله اول و پس از ارائه روش هدف‌گذاری در سال ۱۹۸۶ مورد استفاده قرار گرفت، روش معمول حذف مبدلهائی بود که از نقطه پینچ حرارت عبور می‌دادند و بدین ترتیب حرکت به سمت هدف انرژی تعیین شده بود. در این روش سعی بر این بود که حداقل تغییرات در شبکه صورت گیرد و از مبدلهای موجود حداکثر استفاده صورت گرفته و نصب سطوح جدید به صورت اضافه نمودن پوسته به مبدلهای موجود انجام پذیرد و این امر از طریق شکستن حلقه‌ها و به کمک انتقال حرارت از طریق مسیرها تحقق می‌پذیرفت. در این روش بدلیل در دست نداشتن ابزار مناسب سنجش و طراحی، تضمینی برای دستیابی دقیق به اهداف سطح و نیز در نظر گرفتن محدودیتهای دینامیکی سیستم وجود نداشت، [2].

روش سیستماتیک طراحی و ابزار مورد نیاز ابتدا در سال ۱۹۸۷ توسط Tjoe & Linnhoff بمنظور دستیابی دقیق به اهداف انرژی و سطح ارائه گردید،[3]، و سپس در سال ۱۹۹۲ توسط نویسنده برای در نظر گرفتن محدودیت دینامکی شبکه تکمیل و ابزار لازم جهت سنجش طراحی از لحاظ محدودیتهای افت فشار ارائه گردید،[4] .

در اینجا ابتدا بطور خلاصه روشها و ابزار فوق مورد بررسی قرار گرفته و سپس نتایج بکارگیری آنها بمنظور طراحی اصلاحی شبکه مورد نظر با هدف

حذف گلوگاهها و دستیابی به اهداف تعیین شده ارائه خواهد گردید. لازم بذکر است که اگر چه هیچگونه ابزار ویژه‌ای برای سنجش و طراحی مبدلها در طراحی اصلاحی با هدف رفع گلوگاه وجود ندارد، اما در بسیاری موارد از ابزار موجود با تکنیکهای خاصی استفاده شده تا ضمن دستیابی به اهداف تعیین شده شبکه دچار کمترین تغییر ممکن گردیده و از لحاظ ساختار تا حد ممکن ساده و انعطاف‌پذیر باشد.

طراحی اصلاحی شبکه بمنظور دستیابی به اهداف انرژی و سطح

چنانکه در مقاله شماره ۱ بدان اشاره شد برای دستیابی همزمان به اهداف انرژی و سطح باید میزان تبادل حرارت غیرعمودی را به حداقل رسانید. بعبارت دیگر کاهش تبادل حرارت غیرعمودی نه تنها باعث دستیابی به اهداف سطح می‌گردد، بلکه بدلیل از بین بردن تبادل حرارت از پینچ، دستیابی همزمان به اهداف انرژی را نیز تأمین می‌کند. بنابراین بر خلاف روشهای ابتدائی تنها حذف مبدلهائی که از پینچ حرارت عبور می‌دهند کافی نیست و تبادل حرارت غیرعمودی را باید در تمام نقاط شبکه (چه نزدیک به پینچ و چه دور از آن) تا حد ممکن کاهش داد. از طرف دیگر حذف کامل تبادل حرارت غیرعمودی تنها در صورتی ممکن است که نیروی رانش در هر مبدل دقیقاً برابر با نیروی رانش موجود روی منحنیهای مرکب در آن محدوده دمائی باشد. چنین حالت ایده‌آلی منجر به شبکه‌ای با تعداد زیادی شاخه می‌شود که به آن اصطلاحاً "مدل اسپاگتی" گفته می‌شود. این شبکه بدلیل داشتن تعداد بیش از اندازه مبدلهااز لحاظ اقتصادی و عملی قابل قبول نیست. بنابراین شبکه مناسب حالتی ما بین شبکه بدون تبادل حرارت عمودی و شبکه با حداقل تعداد واحدها است، [5]. دو اصل ذکر شده در بالا راهنمای اصلی در ارائه روشها و ابزار مناسب جهت طراحی شبکه‌های مبدلهای حرارتی است. با توجه به مطالب فوق برای جلوگیری از ایجاد هزینه‌های اضافی باید حتی‌الامکان از انجام تغییرات ساختاری در شبکه احتراز نمود. بدین منظور منطقی‌ترین راه حل اصلاح "محل قرارگیری حرارتی"[1] یک واحد، تنظیم باربر روی مبدلهای دیگر شبکه است. با انجام یک تغییر منطقی و مناسب در بار تنها یک مبدل در شبکه (مثلاً اضافه کردن یک پوسته بطور سری یا موازی و ...) می‌توان درجه حرارتهای خروجی از آن و بنابراین محل قرارگیری آن را تصحیح نمود. در اکثر موارد این درجه حرارتهای خروجی خود وارد یک سری مبدل دیگر شده و محل قرارگیری آن مبدلها و بار آنها را نیز تغییر می‌دهند. بنابراین ایجاد تغییر در یک مبدل، محل قرارگیری تعداد دیگری از مبدلهای شبکه را نیز تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر یک سرمایه‌گذاری می‌تواند باعث بهبود عملکرد کلی شبکه گردد.

مراحل مختلف طراحی

الف ـ تجزیه و تحلیل شبکه و تعیین راندمان عملکرد مبدلها(RPA)

نکته مهمی که هنگام اصلاح شبکه باید به آن توجه نمود این است که حتی‌الامکان باید سعی شود تا مبدلهایی که در محل مناسب قرار گرفته‌اند و یا مبدلهایی که پس از تصحیح دارای عملکرد مناسبی هستند در مراحل بعدی دست نخورده باقی بمانند و به عملکرد صحیح آنها لطمه‌ای وارد نشود. به این منظور نیاز به ابزاری است که بتوان عملکرد تک تک مبدلها را در کل شبکه بررسی و سپس واحدهای با عملکرد صحیح را در محل خود حفظ نمود. راههای مناسب در این سنجش، راندمان سطح شبکه موجود ($\alpha_{existing}$) است.

بدین صورت که بررسی عملکرد هر مبدل در کل شبکه با حذف آن مبدل و جریانهای ورودی و خروجی آن و انجام هدف‌گذاری مجدد برای بقیه مسئله صورت می‌گیرد. این ابزار اصطلاحاً "تحلیل باقیمانده مسئله"[2] نامیده می‌شود و با کمک آن

1 - Thermal Positioning 2 - Remaining Problem Analysis

وضعیت هر مبدل و تأثیر آن بر کل شبکه تعیین می‌گردد. در حقیقت چنانچه راندمان شبکه باقیمانده $\alpha_{i,max}$ نزدیک به ۱ و ΔT_{min} , r_i برابر با ΔT_{min} هدف‌یابی شده باشد مبدل مورد نظر را می‌توان در وضعیت موجود حفظ نموده، در غیر اینصورت تغییر موقعیت آن ضروری است. لازم بذکر است که پذیرفتن مبدلهائی که $\alpha_{i,max}$ آنها نزدیک به ۱ نباشد، در مراحل پایانی تکمیل شبکه و با محدود شدن جریانهای باقیمانده راندمان کلی شبکه را از راندمان مورد نظر کمتر خواهد نمود. همچنین باید به این نکته توجه نمود که در هر مرحله از اصلاح باید یکبار RPA صورت گیرد. زیرا ممکن است مبدلی که به تنهایی دارای راندمان مناسبی در شبکه است در ترکیب با یک مبدل دیگر دارای راندمان پائینی بوده و یا باعث کاهش ΔT_{min} , r_i نسبت به ΔT_{min} هدفیابی‌شده گردد و بنابراین ترکیب آنها علیرغم راندمان مناسب هر یک از آنها قابل پذیرفتن نباشد.

ب - بهبود بخشیدن راندمان عملکرد مبدلهای باقیمانده

با پذیرفتن عملکرد تعدادی از مبدلها و بنابراین حذف نمودن قسمتی از جریانهای مربوط به مبدلهای پذیرفته شده، اکنون باید راهی برای استفاده مجدد از سطوح باقیمانده و قرار دادن آنها در جای مناسب پیدا نمود. برای انجام چنین کاری در وهله اول باید دلیل عملکرد ضعیف هر یک از این مبدلها را تشخیص داد. به عنوان مثال ممکن است یکی از دلایل عملکرد ضعیف مبدل عبور حرارت از پینچ باشد که باید اینگونه مبدلها را تشخیص داد و آنها را به عنوان اولین انتخابها جهت اصلاح در نظر گرفت. پس از مشخص شدن دلیل عملکرد ضعیف مبدلها با تصحیح بارها و به کمک تأثیر متقابل مبدلها بر روی یکدیگر ضعف آنها را برطرف وراندمان آنها را در کل شبکه افزایش داد.

مناسبترین ابزار برای تشخیص دلیل ضعف عملکرد یک مبدل منحنی نیروی رانش (DFP)[3] است. DFP یک منحنی از درجه حرارتهای جریانهای گرم و سرد است واز یک سری خطوط راست تشکیل شده که شیب هر یک برابر با نسبت دبی ظرفیت حرارتی منحنیهای مرکب در آن محدوده دمائی است.

همچنین بر روی این منحنی خط $T_h = T_c$ نیز رسم شده است که فاصله DFP از این خط نشاندهنده دوری و نزدیکی دمای جریانها از یکدیگر است. نزدیکترین فاصله بین این دوخط در حقیقت همان نقطه پینچ است.

هر یک از مبدلهای موجود بر روی شبکه می‌تواند با کمک یک خط راست روی DFP نشان داده شود. اگر خط عملکرد مبدل بطور کامل بر روی DFP قرار گرفت، تبادل حرارت در آن مبدل کاملاً عمودی است. هر چقدر جدایی بین خط عملکرد مبدل و DFP بیشتر باشد تبادل حرارت در مبدل مزبور از حالت عمودی فاصله بیشتری داشته و عملکرد آن ضعیف‌تر است. بنابراین با کمک DFP به خوبی می‌توان دلیل عملکرد ضعیف هر مبدل را در شبکه مشخص و سپس با روشهای گوناگون نسبت به تصحیح آن اقدام نمود. یکی از مؤثرترین روشهای تصحیح عملکرد مبدلها چنانکه گفته شد جابجائی مبدل بدون تغییر جریانهای عبورکننده از مبدل[4] است.

محل قرارگیری یک مبدل بر روی DFP توسط پنج عامل مشخص می‌گردد. دماهای انتهای سرد مبدل، دماهای انتهای گرم مبدل و نسبت دبی ظرفیت حرارتی دو جریان عبورکننده از مبدل. تعویض شرایط محلی با کمک تنظیم درجه حرارتهای اطراف مبدل روشی ساده و مؤثر برای بهبود عملکرد یک مبدل در کل شبکه می‌باشد. گاهی اوقات جهت تصحیح عملکرد یک مبدل در شبکه باید یکی از جریانهای عبور کننده از آن و یا هر دو جریان را تقسیم نمود تا با تغییر نسبت دبی‌های ظرفیت حرارتی، $\frac{CP_c}{CP_h}$، و تصحیح شیب خط عملکرد مبدل این خط به DFP نزدیکتر شود. در مواردیکه شکستن یک جریان به دو یا چند جریان عملی و اقتصادی

3 - Driving Force Plot 4 - Exchanger Shifting

نیست باید با کم کردن بار روی مبدل از تأثیر کلی آن بر شبکه کاست. این کار با تنظیم دماهای دو سر مبدل مورد نظر امکانپذیر است. نکته قابل توجه در این روش آن است که ما می‌توانیم استفاده از سطح هر مبدل در شبکه را تا حد ممکن بهبود ببخشیم بدون اینکه بطور فیزیکی نیاز به ایجاد تغییر در مبدل مورد نظر وجود داشته باشد. پس از اصلاح مبدل مورد نظر به روش فوق باید عملکرد آن بر روی کل شبکه مورد بررسی قرار بگیرد. این بررسی توسط RPA انجام می‌گیرد. چنانچه RPA مفید بودن این تغییر را تأئید نمود ما می‌توانیم مبدل را در محل جدید خود بپذیریم و سپس بار مبدل و همچنین قسمتهایی از جریان را که به مبدل وارد و از آن خارج شده‌اند از اطلاعات جریان حذف و به طراحی بقیه شبکه بپردازیم. برای طراحی باقیمانده شبکه اطلاعات جریانها به روز شده و DFP به روز شده برای بقیه جریانها، مجدداً رسم می‌شود. سپس مبدل بعدی به مکان مناسب خود منتقل و این عمل تا قرارگیری تمامی مبدلها در محل صحیح خود تکرار می‌گردد. پس از پایان این مرحله تمام مبدلهای موجود در شبکه دارای تبادل حرارت عمودی و یا نزدیک به عمودی هستند و راندمان شبکه بهبود پیدا کرده است و پس از این باید صرفاً بارهای حرارتی [5]باقیمانده بر روی جریانهای سرد وگرم را به بهترین وجه با یکدیگر مبادله نمود.

ج - نصب سطوح جدید

در این مرحله به سادگی مبدلهای جدیدی میان بارهای حرارتی جریانهای سرد و گرم قرار می‌گیرند. برای انجام این کار، مانند حالت طراحی از پایه، جریانها به دو قسمت بالا و پایین پینچ تقسیم و با استفاده از ابزار تکنولوژی پینچ از جمله DFP و RPA مبدلهای جدید در نقاط مناسب شبکه قرار داده می‌شوند. همچنین در نصب سطوح جدید سعی بر این است که از طریق افزایش سطح مبدلهای موجود حتی‌الامکان ساختار اولیه شبکه حفظ گردد. در این صورت از فضاها و لوله‌کشی‌های موجود می‌توان استفاده کرده و نیازی به صرف هزینه اضافی برای این قبیل کارها نخواهد بود. در این مرحله نیز پس از برقراری هر تبادل جدید از RPA برای ارزیابی نقش آن در کل شبکه استفاده می‌شود. در نهایت بارهای اضافی باقیمانده در بالا و پایین پینچ که امکان تبادل حرارت آنها با یکدیگر وجود ندارد توسط کوره‌ها و کولرها تبادل می‌شوند و بدین ترتیب میزان انرژی هدف‌گذاری شده قابل دسترس خواهند بود.

د- اصلاحات نهایی[6]

اگر چه در طی مراحل مختلف سنتز شبکه همواره سعی شده است که اصلاح تا حد ممکن با ساختار وضع موجود سازگار باشد. اما غالباً در پایان این مرحله فرصتهائی برای بهبود و نزدیکتر شدن به وضع موجود، وجود دارد. امکان چنین بهبودی توسط توزیع مجدد بارها در کل شبکه از طریق استفاده از حلقه‌ها و مسیرهای موجود در شبکه فراهم خواهد شد. در حقیقت با کمک این حلقه‌ها و مسیرها[7] و با پذیرش میزان قابل قبولی انحراف از حالت ایده‌آل (با عبور مقداری حرارت‌از پینچ و یا کاهش ΔT_{min} از $\Delta T_{min,tar}$ و افزایش سطح انتقال‌از پینچ و یا کاهش ΔT_{min} از $\Delta T_{min,tar}$ وافزایش سطح انتقال حرارت) می توان تعداد واحدها را کاهش داده وتا حد ممکن به شبکه موجود نزدیک شد.

روشها و ابزار فوق که توسط Linnhoff و Tjoc در سال ۱۹۸۷ ارائه گردید، اگر چه در دستیابی به اهداف انرژی و سطح بسیار موفق بودند،اما بدلیل صرفنظر کردن از محدودیتهای دینامیکی عدم هماهنگی میان نتایج هدف‌گذاری و سنتز و طراحی تفصیلی مبدلها به چشم می‌خورد. این نقایص در سال ۱۹۹۲ توسط نویسنده مرتفع گردید. در اینجا به روشها و ابزار جدیدی که برای طراحی اصلاحی مبدلها و سنجش آنها با توجه به محدودیتهای دینامیکی سیستم ارائه شده است به اختصار اشاره

5 - Heat Pocket 6 - Final Evolution 7 - Loops & Paths

می‌گردد.

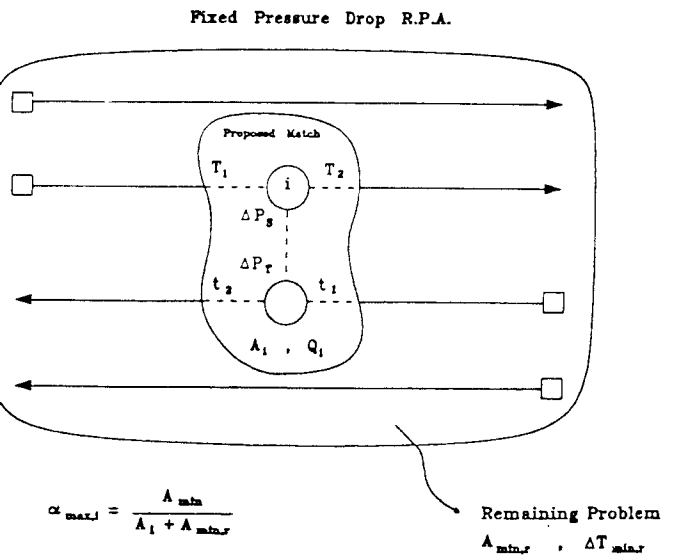
ابزار طراحی اصلاحی به منظور دستیابی به اهداف انرژی و سطح و با در نظر گرفتن محدودیتهای دینامیکی شبکه

برای دستیابی به اهداف تعیین شده در مرحله هدف‌گذاری به روش افت فشارهای ثابت علاوه بر ابزارهای ارائه شده در روش ضرایب انتقال حرارت ثابت دو ابزار جدید توسط نویسنده ارائه گردیده که عبارتند از:

۱ - روش جدید تحلیل باقیمانده مسئله که تاثیرات فشار را همراه با تاثیرات نیروی رانش بخوبی در نظر می‌گیرد.
۲- برآورد افت فشار ایده‌آل هر مبدل [8]

الف - تحلیل باقیمانده مسئله با مقادیر ثابت افت فشار مجاز

تحلیل باقیمانده مسئله در روش ضرایب انتقال حرارت ثابت که توسط Linnhoff & Tjoe ارائه گردید یک تصویر واضح از راندمان حرارتی مبدلها ارائه می‌کند، اما هیچگونه اطلاعی در مورد نحوه استفاده از افت فشار در مبدل ارائه نمی‌نماید. می‌توان نشان داد که استفاده غیر مؤثر از افت فشارهای قابل دسترس باعث کاربرد غیرمؤثر سطح تبادل حرارت شده و بنابراین سرمایه بیشتری مصرف می‌شود. در روش جدید مانند روش ارائه شده Linnhoff & Tjoe اجزاء جریان مربوط به مبدل مورد نظر از اطلاعات جریان حذف می‌شود (در این روش علاوه بر درجه حرارتها و بار مبدل، افت فشار استفاده شده در مبدل نیز از اطلاعات جریان حذف می‌گردد). نحوه انجام این عمل در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) تحلیل باقیمانده مساله برمبنای افت فشارثابت جریانها

برای بررسی اثرات افت فشار ونیروی رانش حرارتی[9] باید از هر دو روش تحلیل باقیمانده مسئله (RPA-Fixed-h , RPA-fixed-ΔP) استفاده نمود. تحلیل باقیمانده مسئله بر مبنای ضرایب انتقال حرارت ثابت راندمان استفاده از نیروی رانش دما را مشخص می‌کند. تحلیل باقیمانده مسئله بر مبنای افت فشارهای ثابت در واقع به ما اطلاعاتی در مورد نحوه عملکرد کلی مبدل در شبکه می‌دهد زیرا این تحلیل تأثیرات نیروی رانش درجه حرارت و افت فشار را بطور همزمان در نظر می‌گیرد. با استفاده ترکیبی از این دو روش می‌توانیم به راحتی راندمان پایین را در رابطه با تأثیرات حرارتی و در رابطه با تأثیرات افت فشار از یکدیگر تفکیک کنیم. برای مثال چنانچه $\alpha_{max,\Delta P}$= ۰/۶۶ و $\alpha_{max,h}$ = ۰/۹۹ باشد نشان می‌دهد که مبدل به خوبی برروی DFP قرار گرفته و از نیروی رانش حرارتی استفاده مؤثر می‌کند، امّا از افت فشار به خوبی استفاده نمی‌نماید و لذا راندمان کلی پایین است. بنابراین باید مبدل را به نحوی تصحیح نمود که افت فشار در داخل آن به شکلی مصرف شود که راندمان کلی افزایش یابد. ابزار سنجش و تشخیص روش اصلاح مبدل از لحاظ استفاده از افت فشار قابل

8 - Ideal Pessure Drop ، 9 - Thermal Driving Force

دسترسی "افت فشار ایده‌آل مبدل" است که در زیر توضیح داده می‌شود.

ب ـ افت فشار ایده‌آل

استفاده مؤثر از افت فشار در مواردی شبیه به استفاده مؤثر از نیروی رانش حرارتی است. آنچه مسلم است افت فشار کلی ثابت و برابر با توان دینامیکی پمپ موجود در دبی جریان مربوطه است. فرض کنید دو مبدل بر روی یک جریان وجود دارد و همچنین فرض کنید بار حرارتی و همچنین نیروی رانش حرارتی آنها نیز با هم برابر است اگر افت فشار در مبدل اولی زیاد باشد در آن از مزیت موضعی سرعت بالا و در نتیجه ضریب انتقال حرارت بالا بهره‌مند هستیم و بنابراین سطح مبدل اول پائین می‌آید. افت فشار زیاد در مبدل اول تنها افت فشار مجاز کوچکی برای مبدل دوم باقی می‌گذارد و نتیجه آن سرعت کم، ضریب انقال حرارت پائین و سطح مبدل بالا است. می‌توان نشان داد که مانند تبادل حرارت غیرعمودی، توزیع ناهماهنگ افت فشار نیز سطح کل مورد نیاز را افزایش می‌دهد. با دانستن افت فشار کل جریان و سطح تماس کلی مربوط به هر جریان می‌توان افت فشار ایده‌آل برای هر مبدل را از طریق روابط زیر محاسبه نمود.

$$(DP_s)_{Ideal} = DP_i \left(\frac{\alpha A_E}{A_{ci}}\right) \qquad (۱)$$

$$(DP_t)_{Ideal} = DP_j \left(\frac{\alpha A_E}{A_{cj}}\right) \qquad (۲)$$

با در دست داشتن افت فشار ایده‌آل در هر مبدل می‌توان مبدل را به نحوی تصحیح نمود که افت فشار آن نزدیک به افت فشار ایده‌آل گردد. یعنی چنانچه افت فشار آن بیشتر از افت فشار ایده‌آل است آن را به طریق مقتضی کاهش و در صورت کمتر بودن از افت فشار ایده‌آل آن را افزایش داد.

طراحی شبکه هدف‌گذاری شده

در این مرحله و با در دست داشتن ابزار مناسب ارائه شده و نیز بکارگیری تکنیکهای مناسب به طراحی و بهینه سازی و طراحی تفصیلی مبدلها پرداخته و نتایج حاصل با نتایج هدف‌گذاری مقایسه خواهد شد.

چنانکه پیشتر اشاره شد اولین قدم برای اصلاح یک شبکه مبدلهای حرارتی، ارزیابی عملکرد مبدلهای موجود در شبکه فعلی (پس از افزایش ظرفیت) است. این ارزیابی شامل سه مرحله است:

الف ـ مشخص نمودن مبدلهائی که از پینچ حرارت عبور می‌دهند.[10]

ب ـ رسم منحنی نیروی رانش و خطوط عملکرد مبدلها در وضع موجود.

ج ـ تحلیل باقیمانده مسئله برای مبدلهای موجود به دو روش افت فشارهای ثابت و ضرایب انتقال حرارت ثابت.

الف ـ مشخص نمودن مبدلهایی که از پینچ حرارت عبور می‌دهند

با توجه به نتایج هدف‌گذاری، برای کاهش مصرف انرژی به میزان ۲۱۲۳۸ kw و رسانیدن آن به حد مجاز ۸۰۴۱۸ kw حداقل اختلاف دمای ممکن (یعنی ΔT_{min}) برابر با $58^{\circ}C$ تعیین شده است. با توجه به منحنی B.C.C. (مقاله شماره ۱) دمای گرم پینچ $290^{\circ}C$ و دمای سرد پینچ $232^{\circ}C$ است. شبکه مبدلهای حرارتی پس از افزایش ظرفیت و مشخص نمودن نقطه پینچ و مبدلهایی که از پینچ حرارت عبور می‌دهند (یعنی H, E6, E3) در شکل (۲) نشان داده شده است.

با توجه به اصول اولیه تکنولوژی پینچ پیش‌بینی می‌گردد که میزان حرارتی که دو مبدل E3 و E6 و همچنین کوره H از پینچ عبور می‌دهند برابر با میزان کاهش پیش‌بینی شده در مصرف انرژی باشد. جدول

10 - Cross-Pinch Exchange Analysis

(۱) محاسبات انجام شده برای تأئید این مطلب را نشان می‌دهد.

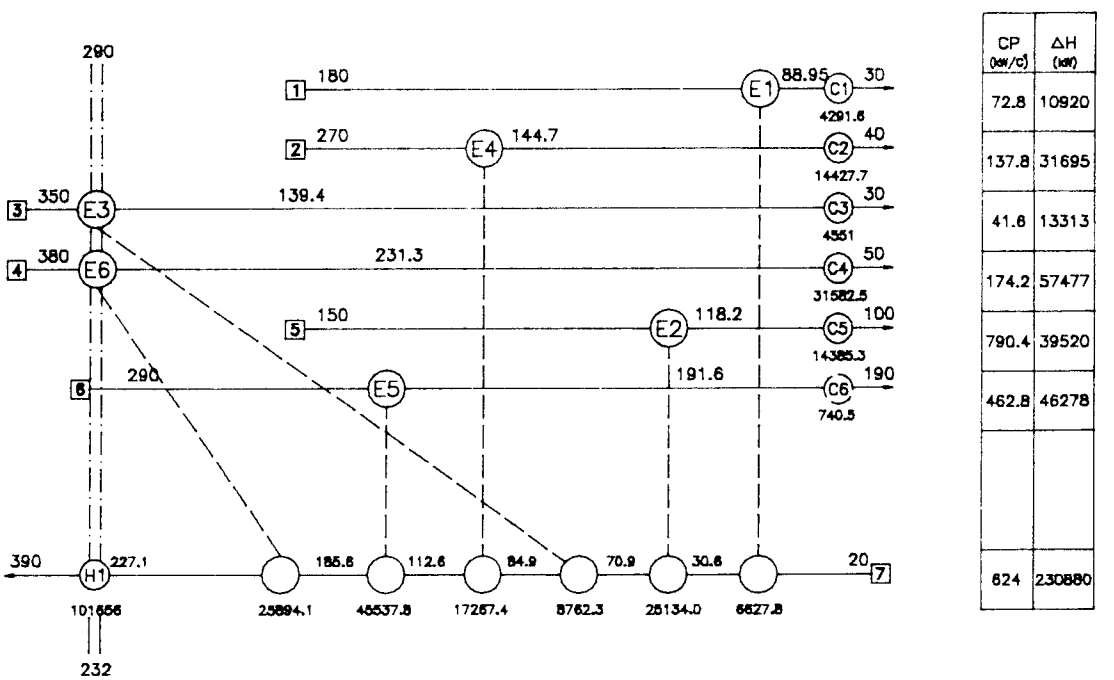
جدول (۱) محاسبه میزان حرارت عبور نموده از پینچ

واحد	محاسبات	میزان انرژی عبورنموده ازپینچ (KW)
E3	(۳۵۰-۲۹۰)×۴۱/۶	۲۴۹۶
E6	(۳۸۰-۲۹۰)×۱۷۴/۲	۱۵۶۷۸
H	(۲۳۲-۲۲۷/۰۹)×۶۲۴	۳۰۶۴
		۲۱۲۳۸

با توجه به نتایج محاسبات ارائه شده در جدول (۱) دیده می‌شود که با اصلاح دو مبدل E3 و E6 وکوره H بتوان به راحتی به هدف انرژی دست یافت. البته این امر به تنهائی تضمینی برای دست یافتن به هدف سطح نیست.

ب ـ رسم منحنی رانش و خطوط عملکرد مبدلها

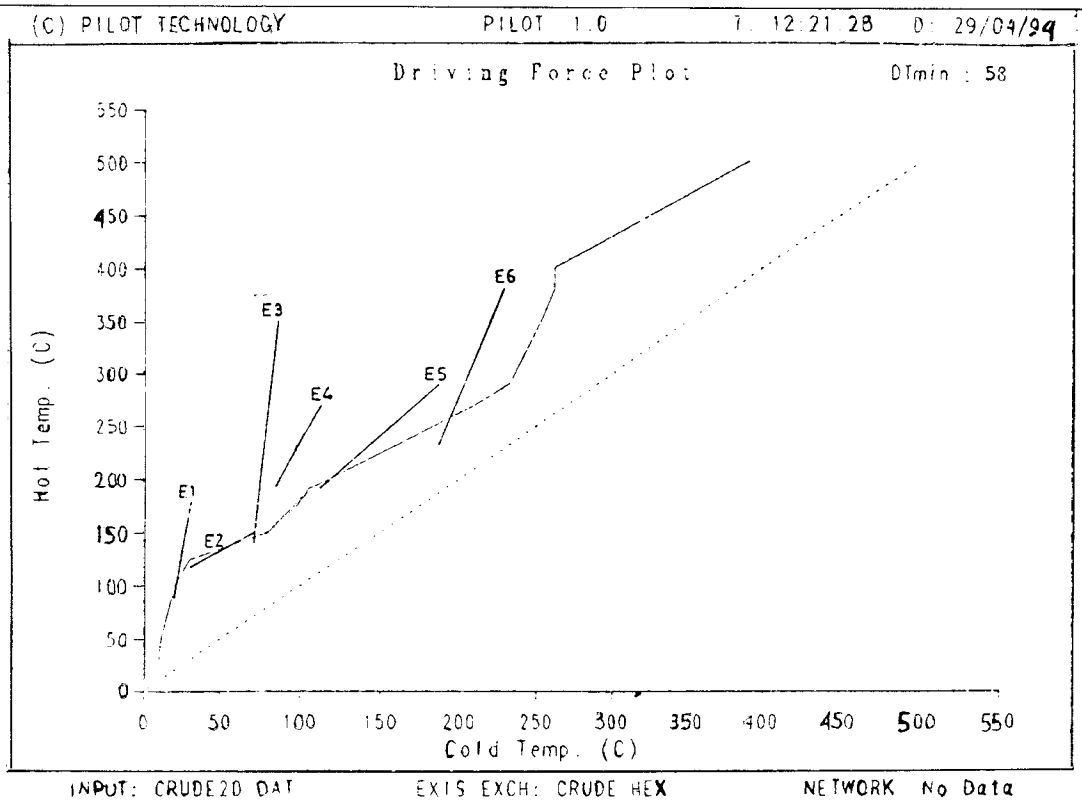
منحنی رانش و خطوط عملکرد مبدلها برای شبکه موجود (پس از افزایش ظرفیت) در شکل (۳) مشخص شده است. با توجه به نحوه قرارگیری خطوط عملکرد می‌توان براحتی مشاهده کرد که هیچیک از مبدلهای موجود بطورعمودی تبادل حرارت نمی‌کنند. همچنین با دقت به خطوط عملکرد مبدلها می‌توان دریافت که مبدلهای E3 و E6 از پینچ حرارت عبور می‌دهند. بنابراین برای پذیرفتن هر یک از مبدلها باید اصلاحات لازم نظیر تقسیم جریانها[11] و انتقال مبدل و یا تغییر جریان[12] را انجام داد. در این مرحله برای تکمیل بررسی کیفی مبدلها و تعیین میزان کارائی آنها تحلیل باقیمانده مسئله برای هریک ازمبدلهاانجام‌گرفته‌است.



CP (kW/C)	ΔH (kW)
72.8	10920
137.8	31695
41.6	13313
174.2	57477
790.4	39520
462.8	46278
624	230880

شکل (۲) مبدلهائی که از پینچ حرارت عبورمی‌دهند($\Delta T_{min} = ۵۸^{\circ}C$)

11 - Sream Splitting 12 - Exchanger Relocation



شکل (۲) منحنی نیروی رانش در ($\Delta T_{min} = ۵۸\ ^{\circ}C$)همراه با خطوط عملکرد مبدلهای موجود

ج ـ تحلیل باقیمانده مسئله

چنانکه اشاره شد RPA-fixed-h , RPA-fixed-ΔP مکمل یکدیگر بوده و دلایل پائین بودن راندمان عملکرد یک مبدل را روشن می‌سازند. در مورد این شبکه از آنجا که افت فشار قابل تأمین توسط پمپهای موجود بسیار کمتر از افت فشار مورد نیاز جهت تبادل حرارت در داخل مبدلها پس از افزایش ظرفیت و بدون اصلاح شبکه است، با توجه به نحوه انجام RPA - fixed - ΔP، انجام این تحلیل غیرممکن است. زیرا بعنوان مثال چنانچه بخواهیم افت فشار مصرفی در داخل مبدل E1 را پس از افزایش ظرفیت (KPa ۶۷/۶) از کل افت فشار قابل دسترس بر روی جریان ۱ که مبدل E1 بر روی آن قرار گرفته است (KPa ۳۶/۵) کم کنیم، افت فشار باقیمانده عددی منفی خواهد بود و انجام هدف‌گذاری برای تعیین حداقل سطح مورد نیاز باقیمانده مسئله و بنابراین انجام RPA-fixed-ΔP برای مبدل E1 غیرممکن است. با همین استدلال می‌توان دریافت که برای هیچیک از مبدلهای موجود در شبکه نمی‌توان تحلیل مزبور را انجام داد. از طرفی با توجه به مطالب بیان‌شده می‌توان نتیجه گرفت که همگی مبدلهای موجود از لحاظ افت فشاری که در داخل مبدل صرف انتقال حرارت می‌گردد باید تصحیح شوند. نکته‌ای که بدان اشاره شد مهمترین تفاوت موجود در طراحی اصلاحی به منظور رفع گلوگاه و طراحی اصلاحی به منظور صرفه‌جوئی در انرژی است زیرا در طراحی اصلاحی به منظور صرفه‌جوئی در انرژی تغییر آرایش پوسته‌ها و لوله‌ها و تعویض ورودیها و مهمتر از همه تقسیم جریان در اکثر موارد برای بهبود بخشیدن نحوه قرارگیری خط عملکرد مبدل بر روی DFP انجام می‌شوند، اما در پروژه‌های اصلاح به منظور رفع‌گلوگاه آنچه در اولویت قرار دارد اصلاح مبدل به منظور قرار گرفتن در محدوده افت فشار مصرفی مجاز است.

جدول (۲) تحلیل وضعیت و محاسبه راندمان مبدلهای موجود در شبکه

$\Delta T_{min,tar}$ = 58 °C $Q_{H,tar}$ = 80418 kW		Constant Coefficient $A_{1-1,min.tar}$ = 10428.9 , Const.$\alpha_{h,max}$=0.889 Incr.$\alpha_{h,max}$=0.930				Fixed Pressure Drop $A_{1-1,min,tar}$ = 10984.8 , Const.$\alpha_{\Delta p,max}$ = 0.892 Incr.$\alpha_{\Delta p,max}$ = 0.933			
Exchanger Name	$\Delta T_{min,r}$	File Name	Exist. A_{1-1}	Remain. $A_{1-1,min}$	$\alpha_{h,max}$	File Name	Exist. A_{1-2}	Remain. $A_{1-2,min}$	$\alpha_{\Delta p,max}$
E1	58	RE1-H	283.8	10183.5	0.996	RE1-P	280		
E2	58	RE2-H	1433.2	9001.0	0.9995	RE2-P	1480		
E3	54	RE3-H	329.5	10706.8	0.945	RE3-P	280		
E4	51.85	RE4-H	885.5	9867.4	0.970	RE4-P	800		
E5	14.72	RE5-H	2610.9	9920.5	0.832	RE5-P	2760		
E6	-Ve	RE6-H	1533.6	-	-	RE6-P	1360		
E1+E2	57.89	RE12-H	1717	8772.1	0.994	RE12-P	1760		

با توجه به مطالب فوق RPA-fixed-h برای شبکه مزبور انجام گرفته و نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که:

- مبدلهای E1 و E2 هر یک دارای راندمان حرارتی مناسب و ترکیب آنها نیز با $\alpha_{max,h}$ = ۰/۹۹۴ و $\Delta T_{min,r}$ = ۵۷/۹ °C از راندمان قابل قبولی برخوردار بوده و نیازی به تصحیح حرارتی ندارند، اما هر دو باید از لحاظ مصرف افت فشار قابل تأمین تصحیح گردند.
- مبدلهای E3 و E4 گر چه دارای راندمان نسبتاً بالا (به ترتیب ۰/۹۴۵ و ۰/۹۷۰) هستند اما به دلیل کاهش $\Delta T_{min,r}$ باید از لحاظ حرارتی تصحیح شوند. و علاوه بر این همانگونه که دیده شد مبدل E3 از پینچ حرارت عبور می‌دهد. و این امر باعث ضرورت بیشتر تصحیح این مبدل است. این دو مبدل نیز علاوه بر تصحیح برای بهبود بخشیدن راندمان حرارتی، باید برای استفاده مناسب از افت فشار قابل تأمین توسط پمپها نیز تصحیح شوند.
- مبدل E5 هم دارای راندمان حرارتی کم و $\Delta T_{min,r}$ بسیار کوچک است و بنابراین هم از لحاظ حرارتی و هم از لحاظ افت فشار باید تصحیح گردد.
- مبدل E6 به دلیل بالا بودن میزان حرارتی که از پینچ عبور می‌دهد با هیچ $\Delta T_{min,r}$ نمی‌تواند به هدف مورد نظر انرژی دست پیدا کند و بنابراین محاسبه راندمان برای این مبدل غیرممکن است. این مبدل به دلیل بار خیلی زیاد و شرایط فوق‌الذکر اولین کاندید برای اصلاح است.

اصلاح عملکرد مبدلهای موجود

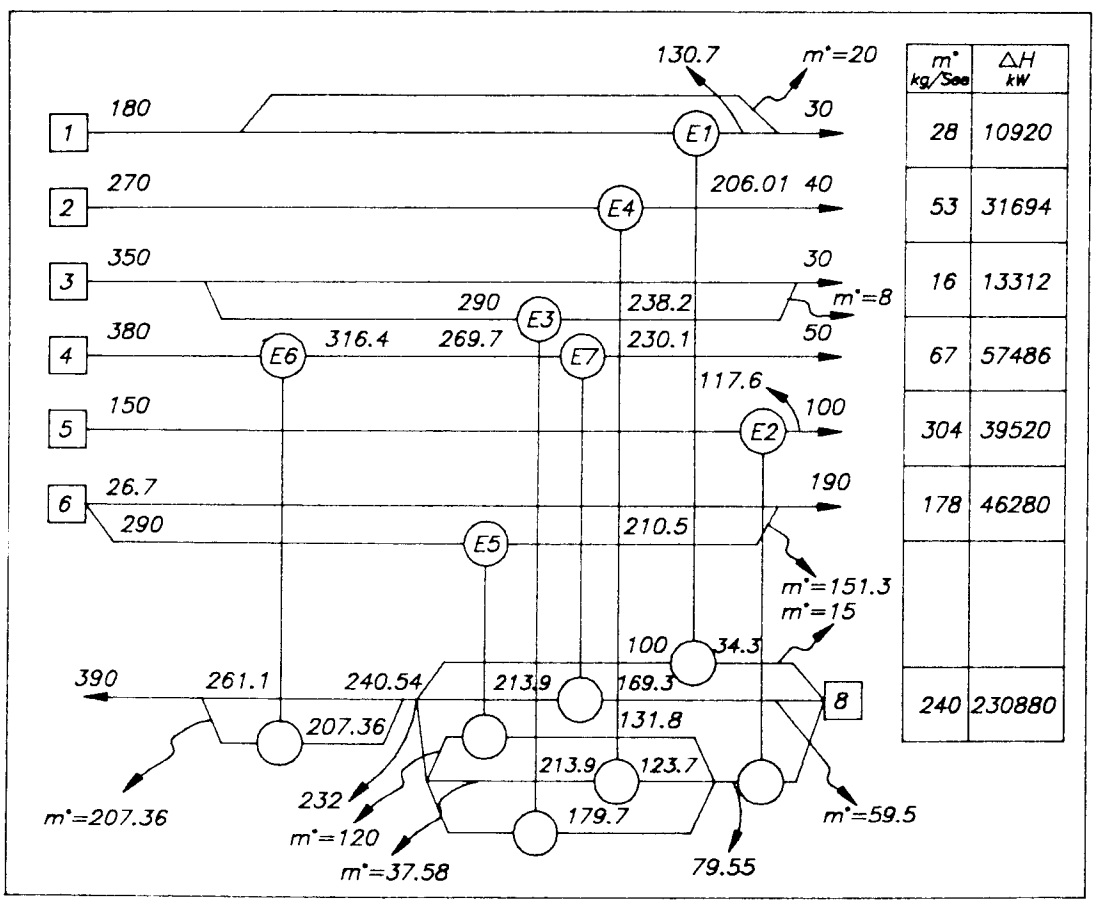
با توجه به ارزیابی بعمل آمده از هر یک از مبدلهای موجود در شبکه، تصحیح عملکرد هر یک از آنها با پیروی از اصول تکنولوژی پینچ و معیارها و ابزارهای معرفی شده انجام پذیرفت. ترتیب اصلاح مبدلها عبارت است از E6 ، E5 ، E3 ، E4 ، E2 ، E1 و

E7 (دو پوسته جداشده از مبدل E6). برای اصلاح و پذیرفتن هر یک از مبدلهای فوق در محل جدید از DFP، خط عملکرد مبدل بر روی آن، RPA-fixed-h , RPA-fixed-ΔP و افت فشار ایده‌آل استفاده شده است. در مواقعیکه محدودیت افت فشار در جریان به اندازه‌ای است که با تغییر آرایش پوسته‌ها امکانپذیر نیست، بهترین ابزار برای پیدا کردن نسبت تقسیم مناسب استفاده از افت فشار ایده‌آل هر جریان است. از آنجا که افت فشار با توان دوم دبی گذرنده از جریان متناسب است، با کمک افت فشار ایده‌آل محاسبه شده می‌توان دبی شاخه مورد نظر و از آنجا نسبت تقسیم جریان را بدست آورد.

$$\frac{(\Delta P_i)\ \text{ideal}}{(\Delta P_i)\text{available}} = \left(\frac{M_{ideal}}{M_{total}}\right)^2 \qquad (۳)$$

با توجه به رابطه فوق M_{ideal} محاسبه شده و با در نظر گرفتن شیب DFP و دبی فوق نسبت مناسبی برای تقسیم جریان بدست می‌آید. از آنجا که محدودیت افت فشار در طراحی اصلاحی به منظور رفع گلوگاه نسبت به طراحی اصلاحی به منظور صرفه‌جوئی در انرژی بیشتر بوده، استفاده از روش فوق در اینگونه پروژه‌ها کاربرد بیشتری دارد. شکل (۴) شبکه وضع موجود پس از افزایش ظرفیت و تصحیح عملکرد مبدلهای موجود را نشان می‌دهد.

بررسی نتایج RPA نشان می‌دهد که در پایان مرحله اصلاح مبدلهای موجود، اهداف انرژی مورد نظر فقط با کاهشی در حدود $۱/۹^{\circ}C$ در ΔT_{min} تثبیت شده و راندمان کل شبکه نیز $\alpha_{max} - \Delta P = ۰/۹۶۶$ است که راندمان بسیار مناسبی در این مرحله می‌باشد.



شکل (۴) شبکه پس از تصحیح عملکرد مبدلهای موجود

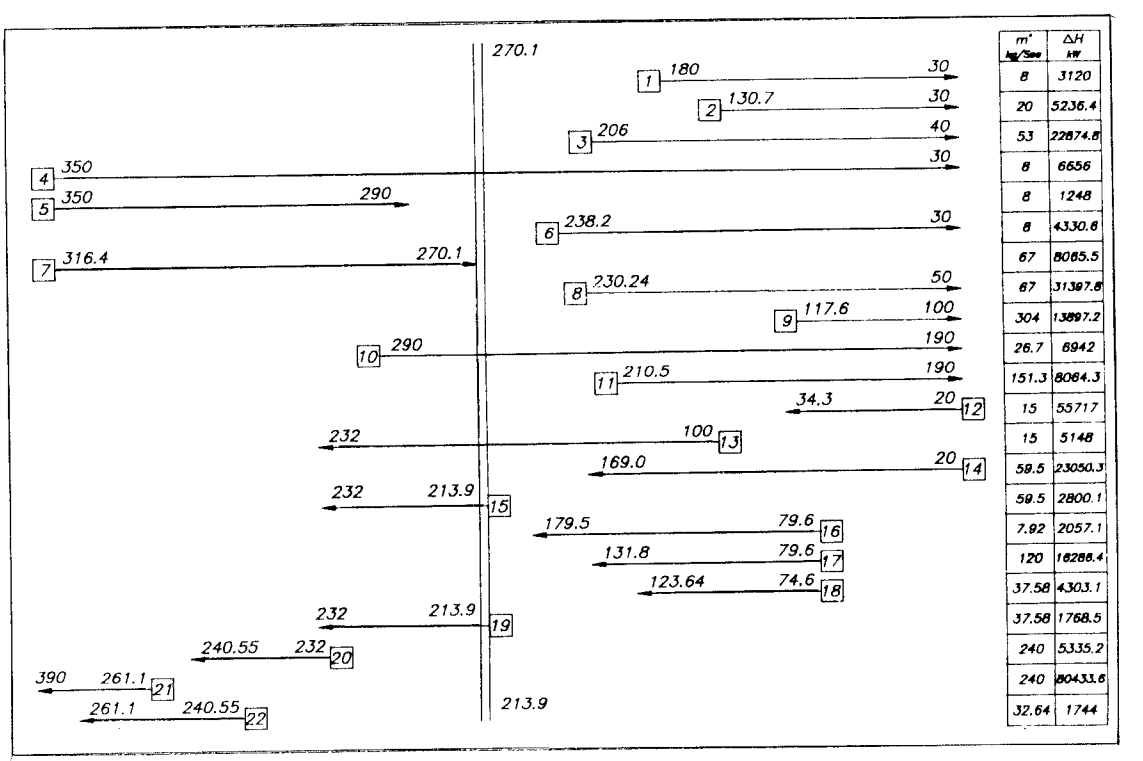
تکمیل شبکه

شکل (۵)، نشاندهنده جریانهای گرم و سرد باقیمانده پس از اصلاح مبدلهای موجود است. چنانکه پیشتر بدان اشاره شد تکمیل شبکه با قراردادن مبدل بر روی جریانهای گرم و سرد باقیمانده صورت می‌گیرد و در انتها جریانها در صورت نیاز به وسیله کولرها و کوره‌ها به دمای نهائی مورد نظر خود می‌رسند. تکمیل شبکه در دو مرحله مجزا در بالا و پائین پینچ و به صورت کاملاً مستقل انجام می‌گیرد تا اصول ترمودینامیکی که تکنولوژی پینچ بر آن استوار است کاملاً رعایت شود.

شکلهای (۶) و (۷) به ترتیب شبکه‌های تکمیل‌شده بالای پینچ و پائین پینچ را نشان می‌دهد. همچنین جداول (۳) و (۴) نتایج طراحی تفصیلی مبدلهای جدید نصب‌شده در بالا و پائین پینچ را نشان می‌دهد.

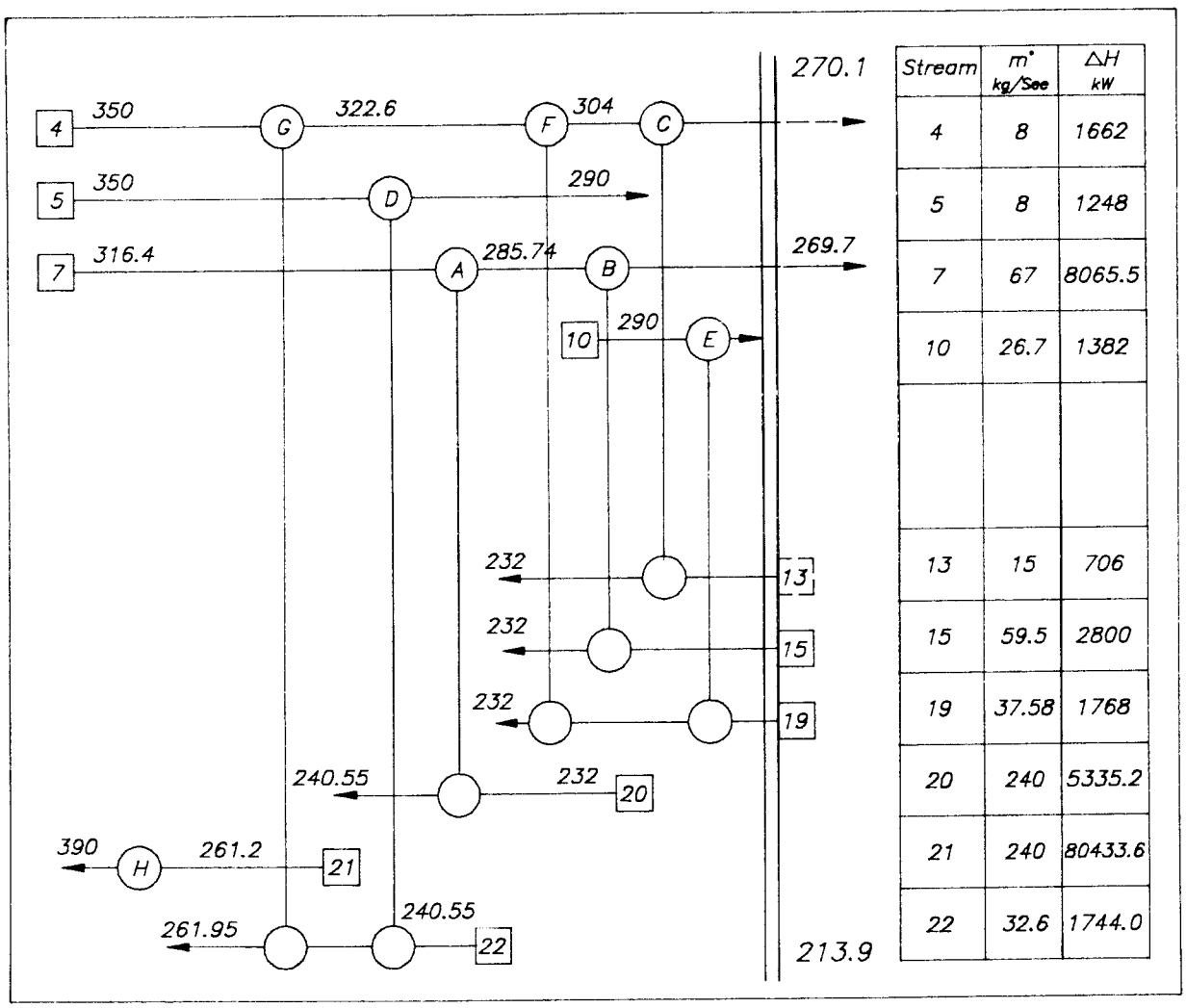
همانگونه که دیده می‌شود تعداد مبدلهای جدید در بالای پینچ ۷ عدد است و راندمان کلی شبکه α_{max}-ΔP پس از قراردادن مبدلهای جدید در بالای پینچ ۰/۹۶۵ محاسبه گردیده است که نشاندهنده حداکثر استفاده از سطوح اضافی نصب شده است.(راندمان کلی پس از نصب هفت مبدل تنها به اندازه ۰/۰۰۱ کاهش پیدا کرده است). همچنین در پایان این مرحله ΔT_{min} از ۵۶/۱ به ۵۷/۴ افزایش پیدا کرده که این امر به معنی بازشدن منحنیهای مرکب و ایجاد سهولت بیشتر در امر تکمیل شبکه در پائین پینچ می‌باشد. طراحی تفصیلی مبدلهای مزبور با مدل Tinker (روش Bell-Delaware) و با کمک الگوریتم ارائه شده توسط نویسنده، [6]، انجام گرفته است.

تعداد مبدلهای جدید در پائین پینچ ۷ عدد و راندمان کلی شبکه (α_{max}-ΔP) پس از قرار دادن آخرین مبدل در پائین پینچ ۰/۹۰۴ است. شکل (۸)



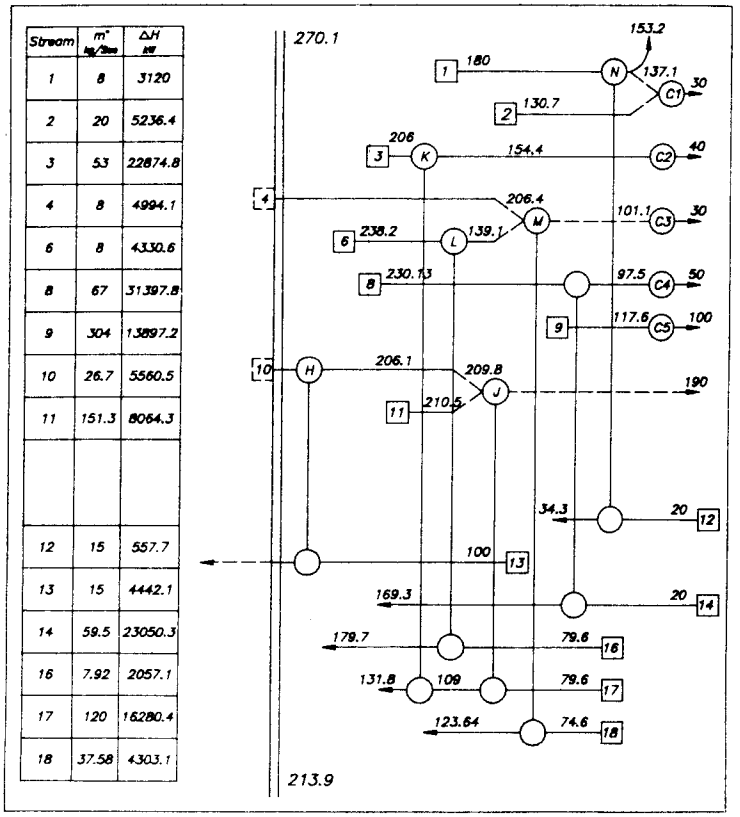
شکل (۵) جریانهای باقیمانده پس از تصحیح عملکرد مبدلهای موجود

شبکه تکمیل شده را نشان می‌دهد. همچنین حلقه‌های ساده موجود در این شبکه با خط چین مشخص شده‌اند. حذف این حلقه‌ها و ادغام مبدلهای موجود در هر یک از این حلقه‌ها، هیچ صدمه‌ای به شبکه وارد نکرده و باعث افزایش سطح مورد نیاز نمی‌گردد، [7]. شبکه نهایی پس از حذف حلقه‌های مزبور در شکل (۹) ارائه شده است.

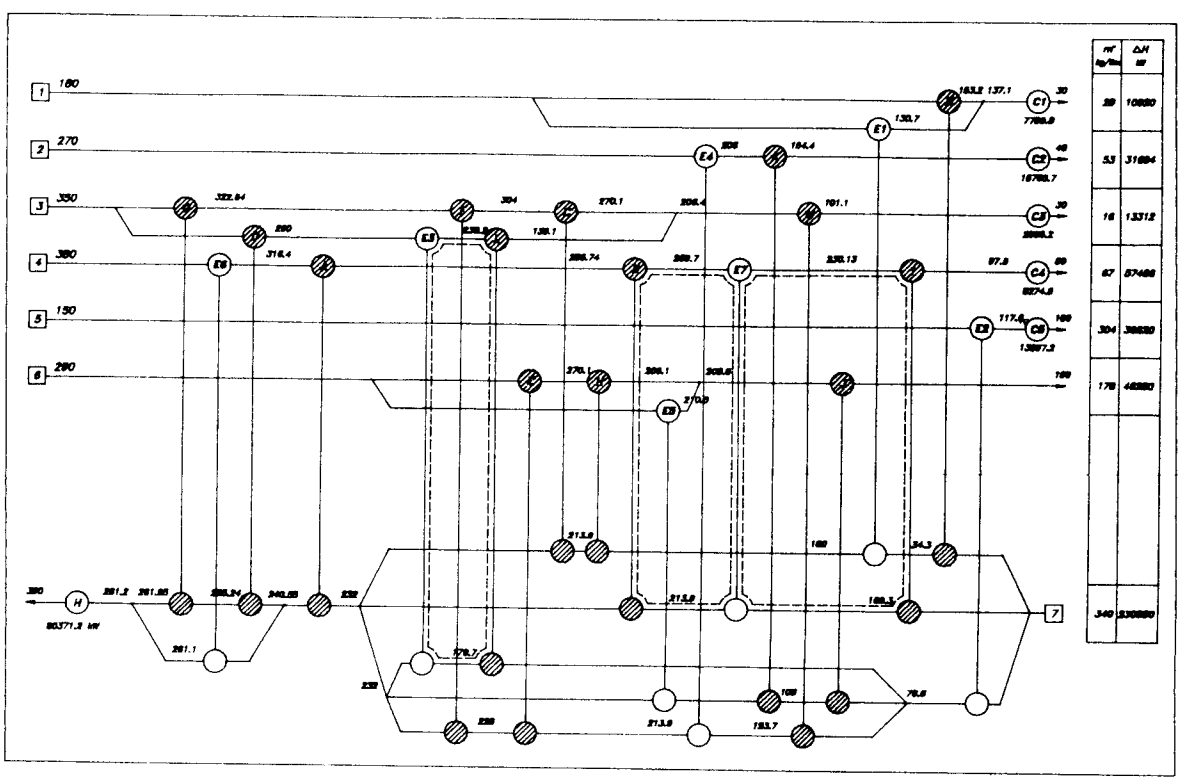


Stream	m° kg/Sec	ΔH kW
4	8	1662
5	8	1248
7	67	8065.5
10	26.7	1382
13	15	706
15	59.5	2800
19	37.58	1768
20	240	5335.2
21	240	80433.6
22	32.6	1744.0

شکل (۶)شبکه تکمیل شده بالای پینچ



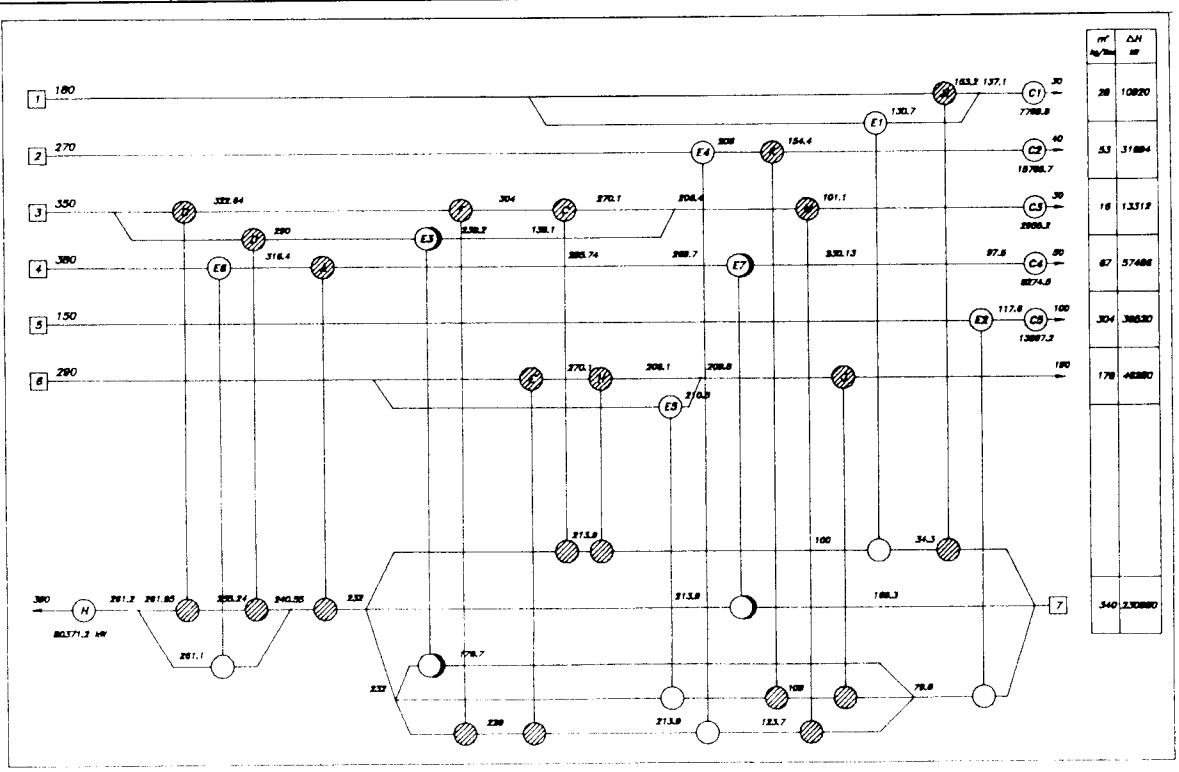
شکل (۷) شبکه تکمیل شده پائین پینچ



شکل (۸) شبکه تکمیل شده اولیه

جدول (۳) نتایج طراحی تفصیلی مبدلهای جدید نصب شده در بالای پینچ

مبدل	A	B	C	D	E	F	G
مساحت (m^2)	۴۴۴/۳	۲۸۴/۹	۶۲/۵	۱۲۷	۱۲۴/۳	۲۵	۵۲
تعدادپوسته (موازی × سری)	۱×۱	۱×۱	۲×۱	۱×۱	۱×۱	۱×۱	۱×۱
قطرپوسته(mm)	۱۵۸۷	۱۰۹۱	۴۶۸	۷۰۳/۷	۶۶۲/۷	۶۲۸/۶	۷۰۶/۶
تعداد لوله ها	۲۷۲۶	۱۲۱۰	۱۹۴	۵۰۱	۴۲۲	۳۷۵	۵۰۶
تعدادگذر لوله	۲	۳	۲	۱	۲	۲	۱
قطر خارجی لوله(mm)	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱
قطر داخلی لوله (mm)	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴
Pitch(mm)	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴
طول لوله (mm)	۲۷۱۸/۵	۳۹۲۷/۳	۲۶۷۳/۵	۴۲۲۸/۷	۴۹۲۱/۱	۱۱۱۵/۷	۱۷۱۵/۸
Baffle cut(%)	۱۹/۴	۳۷/۸	۲۹/۵	۱۹/۰	۲۹/۳	۱۹/۹	۱۷/۵
تعداد Baffle	۶	۵	۱۱	۲۲	۱۵	۵	۹
(ΔP_T)(KPa)	۵/۳۲۸	۸/۳۹۷	۲/۵۰۰	۰/۶۹۱	۹/۸۵۰	۲/۷۵۹	۰/۲۷۵
(ΔP_S)(KPa)	۷/۷۸۶	۳/۹۸۵	۱۵/۱۴۴	۳/۴۲۶	۱۱/۹۰۲	۱/۳۷۱	۲/۰۱۶



شکل (۹) شبکه تکمیل شده نهائی

جدول (۴)نتایج طراحی تفصیلی مبدلهای جدید نصب شده در پائین پینچ

مبدل	H	I	J	K	L	M	N
مساحت (m^2)	۳۰۲/۲	۱۹۱۴/۶	۴۰۶/۸	۶۱۵/۶	۲۰۷/۵	۶۰۴/۳	۱۷/۸
تعدادپوسته (موازی×سری)	۳×۱	۳×۱	۱×۱	۲×۱	۴×۱	۲×۱	۱×۱
قطرپوسته(mm)	۶۱۱/۱	۱۲۱۵/۹	۱۳۵۱/۴	۱۰۹۰/۷	۵۴۳/۱	۹۱۹/۱	۴۰۵/۹
تعداد لوله ها	۳۵۲	۱۵۰۱	۱۸۶۳	۱۲۰۹	۲۴۳	۸۱۶	۱۳۰
تعدادگذر لوله	۲	۴	۴	۳	۶	۴	۳
قطر خارجی لوله(mm)	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱
قطر داخلی لوله (mm)	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴
Pitch(mm)	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴
طول لوله (mm)	۴۷۸۸/۲	۷۰۹۵/۵	۳۶۳۳/۹	۴۲۴۸/۴	۳۵۵۸/۲	۶۱۷۷/۸	۲۲۶۹
Baffle cut(%)	۲۰/۵	۲۹/۶	۲۴/۲	۳۹/۵	۳۲/۸	۲۱/۳	۲۸/۱
تعداد Baffle	۲۶	۱۲	۷	۵	۱۱	۲۱	۱۱
(ΔP_T)(KPa)	۱۹/۱۳۷	۶۹/۱۲۳	۲۸/۳۵۶	۱۴/۰۶۴	۱۰۰/۸۹۲	۱۰۴۸۰	۶/۵۲۶
(ΔP_S)(KPa)	۴۷/۶۴۲	۳۳/۶۰۹	۵۴/۰۱۷	۲۱/۹۴۰	۴/۲۷۶	۵۰/۱۸۰	۱۲/۲۷۰

بحث و نتیجه‌گیری

چنانکه در شکل (۹) دیده می‌شود، مصرف انرژی در کوره H برابر با ۸۰۳۷۱/۲kw است که در حدود ۰/۲۲٪ کمتر از انرژی مصرفی هدف‌گذاری شده (۸۰۴۱۸kw) است، همچنین کل سطح بکاررفته برای اصلاح شبکه برابر $5190m^2$ است که ۳/۰۶٪ کمتر از میزان پیش‌بینی شده در مرحله هدف‌گذاری است. راندمان نهایی شبکه ۰/۹۰۴ محاسبه شده که نسبت به راندمان پیش‌بینی شده، ۱/۳۴٪ بهتراست.

دیده می‌شود که همه عوامل مورد توجه در اصلاح، به بهترین وجهی برآورد گردیده و در حقیقت روش پیشنهادشده برای هدف‌گذاری به منظور رفع گلوگاه با دقت بسیار خوبی قادر به پیش‌بینی میزان سطح اضافی مورد نیاز گردیده است. همچنین انجام برآوردهای اقتصادی بر مبنای اعداد ارائه شده در هدف‌گذاری و اعداد بدست آمده در پایان طراحی با یکدیگر مقایسه شده و تطابق بسیار خوبی را نشان میدهد. جدول (۵) به مقایسه اعداد مزبور و محاسبه خطای نسبی آنها پرداخته است.

جدول (۵) مقایسه نتایج طراحی و هدف‌گذاری

	هدف‌گذاری	طراحی	تفاوت
انرژی صرفه‌جوئی شده(MW)	۲۱/۲۳۸	۲۱/۲۸۵	+٪۰/۲۲
سطح اضافی موردنیاز(m^2)	۵۳۵۴	۵۱۹۰	-٪۳/۰۶
راندمان کلی	۰/۸۹۲	۰/۹۰۴	+٪۱/۳۴
صرفه جوئی (million £ /Year)	۱/۶۳۵۳۲۶	۱/۶۳۹۰۰۵	+٪۰/۲۲
سرمایه گذاری (million £)	۱/۴۱۶۸۰۹	۱/۴۲۹۷۴۳	+٪۰/۹۱
دوره برگشت سرمایه (Year)	۰/۸۶۶۴	۰/۸۷۲۳	+٪۰/۶۸

References

1- Shenoy U.V., (Indian Institue of Technology), Heat Exchanger Networks Synthesis' Published In U.S.A., 1995.

2- Linnhoff B.& Hindmarsh E., "The Pinch Desigh Method" for H.E.N.', Chem. Eng. Sci., 1983,38,745.

3- Tjoe T.N.& Linnhoff B., "Achieving the Best Energy Saving Retrofit", AICHE Annual Meeting, Houston, March 29- April 4,1987.

4- Panjeh Shahi M.H., "Pressure Drop Consideration in Process Intesration", Ph.D. Theses Report, UMIST, Feb. 1992.

5- Ahmad S.& Smith R., "Targets and Design for Minimum number of shells in H.E.N.', Trans. Lcheme, 67, PP. 481-499, 1989.

6- Polley G.T., Panjeh Shahi M.H. and Nunez M.P., Rapid Design Algorithm for Shell-and-tube and Compact Heat Exchangers', Trans IChemE 69 A, PP. 435-444,1991.

۷ـ مهران غفوریان صدیق ، " اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با در نظر گرفتن محدودیتهای افت فشار"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، آبانماه ۱۳۷۳.

قدردانی : نویسندگان این مقاله از دانشگاه تهران که اعتبارات موردنیاز این پژوهش را در اختیار گذاشته‌اند سپاسگزاری می‌نمایند.