اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار ۱ـ هدف‌گذاری

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

چکیده

اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی با هدف صرفه‌جویی در مصرف انرژی و یا رفع گلوگاه در سالهای اخیر به عنوان یکی از مهمترین مباحث مهندسی سیستم‌های فرایند[1] مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل و طراحی این شبکه‌ها به کمک تکنولوژی پینچ[2] بدلیل مبنای ترمودینامیکی قوی و نیز عملی‌بودن و سهولت کاربرد، بعنوان کارآمدترین ابزار به منظور اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی در صدها پروژه صنعتی بکار گرفته شده است. روش‌های موجود براساس این تکنولوژی با هدف اصلاح به منظور رفع گلوگاه یا اساساًبرمبنای ضرایب انتقال حرارت مفروض و ثابت بوده و یا تنها با توجه به شرایط پس از اصلاح فرایند به تصحیح ضرایب مزبور می‌پردازند. بنابراین نتایج حاصل از چنین روشهایی در مرحله هدف‌گذاری با نتایج حاصل از طراحی تفصیلی مبدلها هماهنگی نداشته و درنهایت باعث بروز نارسایی‌هایی در سیستم هیدرودینامیکی واحد می‌گردد. در این مقاله باتوجه به معادلات موجود برای ارتباط میان افت فشار مجاز جریانها، سطح تبادل حرارت بر روی هر جریان و ضریب انتقال حرارت هر جریان و نیز الگوریتم برآورد سطح برمبنای افت فشار ثابت (بجای ضرایب انتقال حرارت ثابت) روش جدیدی به منظور برآورد سطح موردنیاز جهت غلبه بر محدودیت‌های حرارتی و دینامیکی واحد ارائه شده است. از آنجاکه این روش کلیه محدودیتهای واحد را بطور همزمان و در مرحله هدف‌گذاری مورد توجه قرار می‌دهد نیازی به تغییر و یا تقویت پمپها و کمپرسورهای موجود در واحد پس از مرحله طراحی تفصیلی نخواهد بود و نتایج این دو مرحله تطابق کامل با یکدیگر دارند. روش طراحی و دستیابی به اهداف تعیین‌شده در مرحله هدف‌گذاری در مقاله شماره ۲ ارائه گردیده است.

مقدمه

آغاز بحران انرژی و افزایش شدید قیمت نفت در بازارهای جهانی در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی باعث گردید تا کشورهای صنعتی غرب که اکثراً واردکننده نفت خام بودند، تحقیقات گسترده‌ای را در راستای دسترسی به تکنولوژی جدیدی که بتواند مصرف انرژی را در یک فرایند شیمیایی به حداقل برساند و از این طریق باعث کاهش هزینه‌های جاری تولید و نیز کاهش وابستگی به کشورهای صادرکننده نفت گردد، آغاز نمایند.

1- Process Systems Engineering
2- Pinch Technology

در این راستا بیشترین تحقیقات و بررسیها به منظور بهینه‌سازی شبکه مبدلهای حرارتی، به عنوان اصلی‌ترین بخش فرایند از لحاظ امکان بازیافت انرژی صورت گرفته است. طراحی و بهینه‌سازی شبکه مبدلهای حرارتی در یک فرایند به دو شاخه طراحی از پایه[1] و طراحی اصلاحی شبکه‌های موجود[2] تقسیم می‌شود. طراحی اصلاحی شبکه مبدلهای‌حرارتی به طور کلی با دو هدف جداگانه انجام می‌گیرد:

ـ اصلاح شبکه موجود به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی[3]

ـ اصلاح شبکه موجود به منظور رفع گلوگاه[4]

اولین تلاشها جهت ارائه روشهای علمی و سیستماتیک جهت طراحی اصلاحی شبکه مبدلهای حرارتی از حدود سال ۱۹۸۵ میلادی آغاز شد. اهداف اصلی این روشها عبارتند از:

ـ کاهش مصرف انرژی در شبکه موجود (و یا افزایش ظرفیت واحد).

ـ حداکثر استفاده از مبدلهای موجود در شبکه.

ـ شناسایی اصلاحات موردنیاز جهت بهینه‌نمودن شبکه براساس شرایط اقتصادی موجود.

این روشها به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

ـ روشهای مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی[5]

ـ روشهای مبتنی بر تکنولوژی پینچ که بر اصول ترمودینامیکی استوار است.

بررسی روشهای گوناگون پیشنهاد شده برای اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی براساس تکنولوژی پینچ نشان می‌دهد که این روشها عموماً بدلیل پایه‌های نظری قوی و نیز ساده و قابل اجراء بودن آنها نسبت به روشهای ریاضی کاربرد بیشتری داشته و امروزه این تکنولوژی به عنوان ابزاری قابل اتکاء برای طراحی از پایه و طراحی اصلاحی شبکه‌های مبدلهای حرارتی بکار گرفته می‌شود [1].

نظر به اهمیت روزافزون افزایش ظرفیت واحدهای تولیدی به منظور تأمین نیاز بازار مصرف و نیز جلوگیری از صرف هزینه‌های اضافی به منظور ایجاد واحدهای جدید، اصلاح واحدهای موجود به عنوان مناسب‌ترین راه حل برای افزایش تولید با حداقل هزینه‌های ممکن درنظر گرفته شده است. اصلاح فرایندها و بکارگیری تکنولوژیهای مدرن در بخشهای مختلف واحد علاوه بر ارتقاء سطح تولید تبعاتی همچون افزایش افت فشار و مصرف انرژی مورد نیاز در شبکه مبدلهای حرارتی را نیز همراه خواهد داشت.

جبران این افزایش‌ها و یا به عبارت دیگر رفع این گلوگاه‌ها به دو صورت امکانپذیر خواهد بود:

الف) نصب کوره جدید (جهت تأمین انرژی اضافی از خارج) و بکارگیری پمپ‌های قویتر (برای جبران افت فشارهای اضافی حاصل از افزایش دبی جریانها و در بعضی موارد افزایش سطح تبادل حرارت موجود بر روی جریانها).

ب) اصلاح شبکه موجود به منظور بازیافت بهتر انرژی از جریانهای گرم و استفاده بهینه از پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود، به گونه‌ای که نیازی به کوره و پمپ‌های جدید نباشد.

باتوجه به اینکه شبکه‌های موجود عمدتاً از حالت بهینه فاصله داشته و زمینه‌های بسیاری برای بهبود بازیافت انرژی و توزیع مناسب افت فشار در آنها وجود دارد، اصلاح آنها بگونه‌ای که پاسخگوی ظرفیت‌های جدید واحد و یا اصلاحات احتمالی صورت گرفته در آن باشد، یقیناً با صرفه‌تر خواهد بود. در اینجا روشی ارائه شده است که با

1- Grass - root Design 2- Retrofit Design 3- Retrofit for Energy Saving 4- Retrofit for Debottlenecking
5- Mathematical Programming

کمک آن می‌توان شبکه مبدلهای حرارتی را بـه مـنظور رفـع گلوگاه با اطمینان اصلاح نمود. لازمه انجام چنین اصلاحی در وهلهٔ اوّل اطلاع از مشخصات شبکه اصلاحی بهینه باتوجه به شرایط موجود پس از اصلاح فـرایـند و یـا افـزایش ظـرفیت واحد و نیز درنظر گرفتن کلیه محدودیت‌های واحد، و پس از آن در دست داشتن ابزارهای لازم و کارا به منظور دستیابی به اهداف تعیین شده است.

مروری بر روشهای موجود جهت اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی باکمک تکنولوژی پینچ

الف ـ اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی با هـدف صـرفه‌جویی در انرژی با فرض ضرایب انتقال حرارت ثابت

این روش که نخستین بار توسط جـو [1] و لیـنهوف[2] و در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ ارائه گردید با اندک اصلاحاتی تا سال ۱۹۹۲ به عنوان تنها روش اصـلاح سـیستماتیک شـبکه‌های مبدلهای حرارتی بکار گرفته می‌شد، [2] و [3].

در ایـن روش بـراسـاس نـتایج کـارهای لیـنهوف و هیندمارش[3] در سال ۱۹۸۳ ، [4] ، لینهف و تانسند[4] [5] ، ابتدا روشی به منظور برآورد ΔT_{min} بهینه و میزان کاهش مصرف انرژی مرتبط با آن (ΔE_{tar}) و نیز روشی بـه مـنظور بـرآورد سطـح مـوردنیاز اضافی (ΔA_{min}) جهت دستیابی به اهـداف انرژی در ΔT_{min} بهینه ارائه و پس از آن در سال ۱۹۸۷ بـرای اولین بار روشی سیستماتیک، غیر از روشهای معمول در آن زمان برای طراحی از پایه، به منظور دستیابی به اهداف ازپیش تعیین‌شده در پروژه‌های طراحی اصلاحی تبیین گردید.

باتوجه به اصول تکـنولوژی پـینچ، اهـداف مـوردنظر از لحاظ مصرف انرژی را می‌توان باکمک اطـلاعات حـرارتـی فرایند و با استفاده از "منحنی‌های مرکب"[5] که نشاندهنده منابع و چاله‌های یکی‌شده حرارت در فرایند هستند بدست آورد. هم‌پوشانی این دو منحنی حداکثر بازیافت حرارتی ممکن را نشـان مـی‌دهد و دو مـنطقه بـالا و پـایین کـه خـارج از هم‌پوشانی ذکر شده هستند، حداقل مصرف انرژی موردنیاز در هیترها و کولرها را تعریف می‌نماید و حداقل فاصله میان آنها، نقطه پینچ ، حداقل اختلاف دمای شبکه، ΔT_{min}، را نشان می‌دهد، شکل (۱).

افزایش فـاصله مـیان دو مـنحنی بـاعث افـزایش نـیروی رانش[6] و درنتیجه کاهش هزینه‌های اولیه و کاهش آن بـاعث کاهش هزینه عملیاتی خواهد گردید. بدین ترتیب مـقایسه[7] بین این دو هزینه و درنتیجه انتخاب ΔT_{min} بهینه باتوجه بـه محدودیتها و امکانات موجود براحتی باکمک ایـن مـنحنیها میسّر می‌گردد.

همچنین می‌توان نشان داد اگر جریانهای فرایند در یک شبکه به نحوی با یکدیگر تبادل حرارتی نمایند کـه خـطوط تبادل حرارت جریانها با یکدیگر بر روی مـنحنیهای مـرکب کاملاً عمودی باشند. شکل (۱)، سطح انتقال حرارت موردنیاز در شبکه به حداقل کاهش خواهد یـافت. در یک سـیستم بـا فرض ضرایب انتقال حرارت ثـابت و یکسـان بـرای تـمامی جریانها، فرض تبادل حرارت عمودی جریانها، ما را به سمت میزان دقیق حداقل سطح موردنیاز هدایت می‌کند. تـوجه بـه این نکته ضروری است که برای ضرایب انتقال حرارت نابرابر مدل تبادل حرارت عمودی یک فرض ساده کننده است. نتایج حاصل از چنین فرضی در محاسبه حداقـل سـطح مـوردنیاز برای تبادل حرارت نشان می‌دهد که این فرض باتقریب بسیار خوبی در اغلب موارد قابل استفاده است.

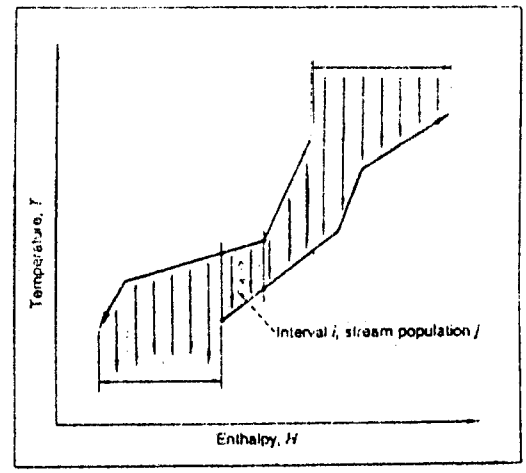
لینهوف و تانسند برای چنین شرایطی رابطه ریاضی سـاده‌ای

1- Tjoe 2- Linnhoff 3- Hindmarsh 4-Townsend 5- Composite Curves 6- Driving Force
7-Trade off

به شکل زیر را ارائه نمودند که بعدها به فرمول بث[1] شهرت یافت، [5] .

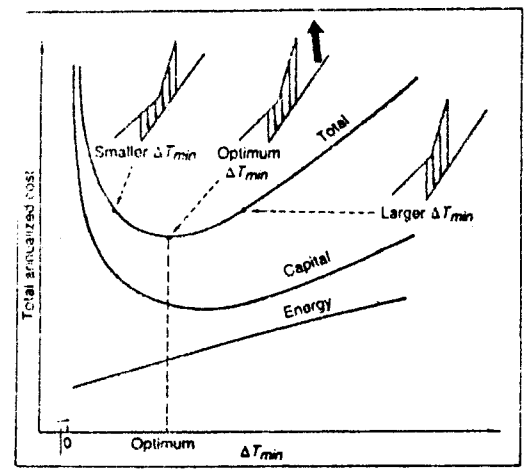
$$A_{target} = \sum_{i}^{intervals} \frac{1}{\Delta T_{LM_i}} \left[\sum_{i}^{streams} \frac{q_j}{h_j}\right]_i \qquad (۱)$$

در هر محدوده i، jجریان سرد و گرم با بارهای حرارتی مربوطه و ضرایب انتقال و ضرایب کثیفی مخصوص خود قرار دارند و ΔT_{LM_i} مربوط به هر محدوده دمایی است.



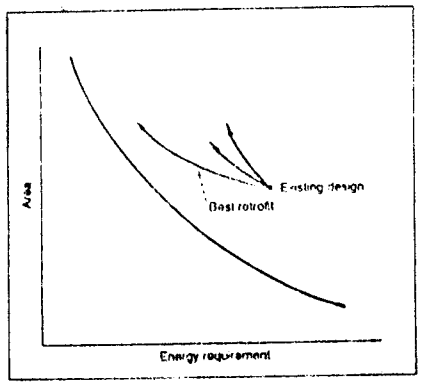
شکل (۱) منحنیهای مرکب و تبادل حرارت عمودی

همانگونه که اشاره شد اهداف انرژی و سطح هر دو تابعی از حداقل اختلاف دما، ΔT_{min} ، هستند. بنابراین این دو هدف از طریق ΔT_{min} قابل ارتباط و درنتیجه قابل بهینه‌سازی هستند، شکل (۲).



شکل (۲) ΔT_{min} بهینه هر دو عامل هزینه انرژی و سرمایه گذاری اولیه را درنظر می‌گیرد.

جو و لینهوف در سال ۱۹۸۶ با تبدیل منحنی هزینه کل و ΔT_{min}، شکل (۲)، به منحنی انرژی ـ سطح، شکل (۳)، نشان دادند که شبکه بهینه برای اصلاح مبدلهای حرارتی با شبکه بهینه در طراحی از پایه تفاوت داشته و درحقیقت امکان دستیابی به شبکه بهینه طراحی از پایه بدلیل محدودیت‌های موجود در واحد ساخته شده و نیز بدلیل اینکه غالباً دستیابی به چنین شبکه‌ای منجر به حذف بخشی از سطوح انتقال حرارت موجود در شبکه می‌گردد، وجود ندارد. بنابراین دستیابی به شبکه بهینه در طراحی اصلاحی با توجه به محدودیتهای سرمایه گذاری و با افزایش مقدار مشخصی سطح انتقال حرارت در شبکه امکانپذیر می‌گردد. به بیان دیگر، منحنی انرژی ـ سطح نشان داد که باید استفاده غیرمؤثر در اثر تبادل حرارت غیرعمودی[2] را تا حد ممکن کاهش دهیم و این در حالی است که منحنی‌های مرکب را نیز برای کاهش مصرف انرژی به هم نزدیکتر می‌کنیم. برای دستیابی به اهداف فوق باید بر روی منحنی فرضی «بهترین منحنی اصلاح» که در شکل (۳) نشان داده شده است حرکت نمود.



شکل (۳) منحنی انرژی ـ سطح و مسیر انتخابی برای هدف‌گذاری سطح و انرژی

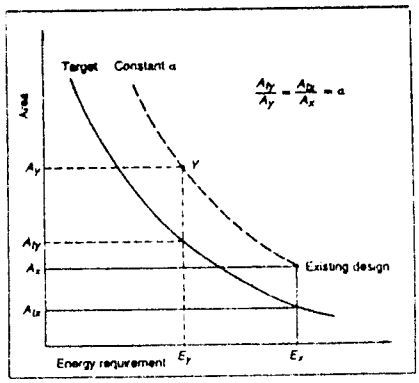
متأسفانه پیدا کردن «بهترین منحنی اصلاح» تابع پیچیده‌ای

1- Bath Formula 2- Criss - Crossing

از محدودیت‌های واحد و فرایند است و بنابراین رسم آن غیرممکن می‌نماید. جو و لینهوف نشان دادند اگر چه دسترسی به بهترین منحنی بسیار مشکل است، اما این امکان وجود دارد که حداقل قابل دسترسی را پیش‌بینی کرد، [2]. روش پیشنهادی آنان که به روش "راندمان ثابت"[1] موسوم است، براین اساس استوار است که شبکه پس از اصلاح، از سطوح موجود حداقل با راندمان شبکه اولیه استفاده خواهد نمود. این راندمان به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha = \left(\frac{A_{ideal}}{A_{existing}}\right)_{\text{existing energy}} \qquad (۲)$$

چنانچه می‌توان پیش‌بینی نمود مقدار α برابر با نشاندهنده وجود تبادل حرارت کاملاً عمودی است. هرچه α پایینتر باشد از سطوح موجود ناموثرتر استفاده شده و تبادل حرارت غیرعمودی در شبکه بیشتر است. چنانچه فرض کنیم α برای همه مقادیر مصرف انرژی ثابت باشد، آنگاه شکل (۴) برای هدف‌گذاری جهت اصلاح حاصل می‌گردد. [1].



شکل (۴) منحنی هدف‌گذاری با راندمان ثابت

گرچه منحنی راندمان ثابت، یک مرز قابل قبول برای یک اصلاح مناسب ارائه می‌دهد، اما برای هدف‌گذاری سطح موردنیاز و صرفه‌جویی انرژی مربوطه این روش بسیار محتاطانه است. سیلانجوا[2] در سال ۱۹۸۷ پیشنهاد نمود که اگر راندمان شبکه موجود کوچکتر از ۰/۹ باشد می‌توان برای هدف‌گذاری اصلاح از یک منحنی به موازات منحنی ایده‌آل استفاده نمود[3]، [6]. چنانچه هنگام طراحی ابزار مناسب در اختیار داشته باشیم می‌توان انتظار داشت که سطوح جدید همگی با راندمان ۱۰۰٪ به شبکه اضافه شوند و بنابراین فاصله از حالت ایده‌آل تنها به میزان اولیه خود باقی بماند. به عبارت دیگر فاصله عمودی منحنی انرژی ـ سطح و منحنی هدف‌گذاری همواره ثابت و برابر اختلاف سطح اولیه میان سطح ایده‌آل و سطح موجود در نقطه مصرف انرژی اولیه می‌باشد.

با در دست داشتن دو روش فوق و با توجه به محدودیتهای فرایند و نیز شرایط اقتصادی موجود امکان تعیین اهداف انرژی، سطح و ΔT_{min} بهینه وجود خواهد داشت. چنانکه گفته شد در این روش کلیه مراحل براساس ضرایب انتقال حرارت مفروض و ثابت انجام می‌گیرد و این امر باعث بروز نارسائیها و اشکالاتی در نتایج تحلیل و طراحی می‌گردد که در قسمتهای بعد به آن اشاره خواهیم کرد.

ب ـ اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی باهدف صرفه‌جویی در انرژی با درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار

طراحی شبکه‌های مبدلهای حرارتی با کمک تکنولوژی پینچ مشتمل بر سه مرحله اساسی است:

۱ـ هدف‌گذاری[4]

۲ـ سنتز و بهینه‌سازی[5]

۳ـ طراحی تفصیلی[6]

چنانکه گفته شد در روش جو و لینهوف که تا سال ۱۹۹۲ بکار گرفته می‌شد، دو مرحله ابتدایی براساس ضرایب مفروض و ثابت انتقال حرارت بوده و ملاحظات افت فشار

1- Constant 2- Silangawa 3- Incremental α 4-Targeting 5- Synthesis and Optimization
6- Detailed Design

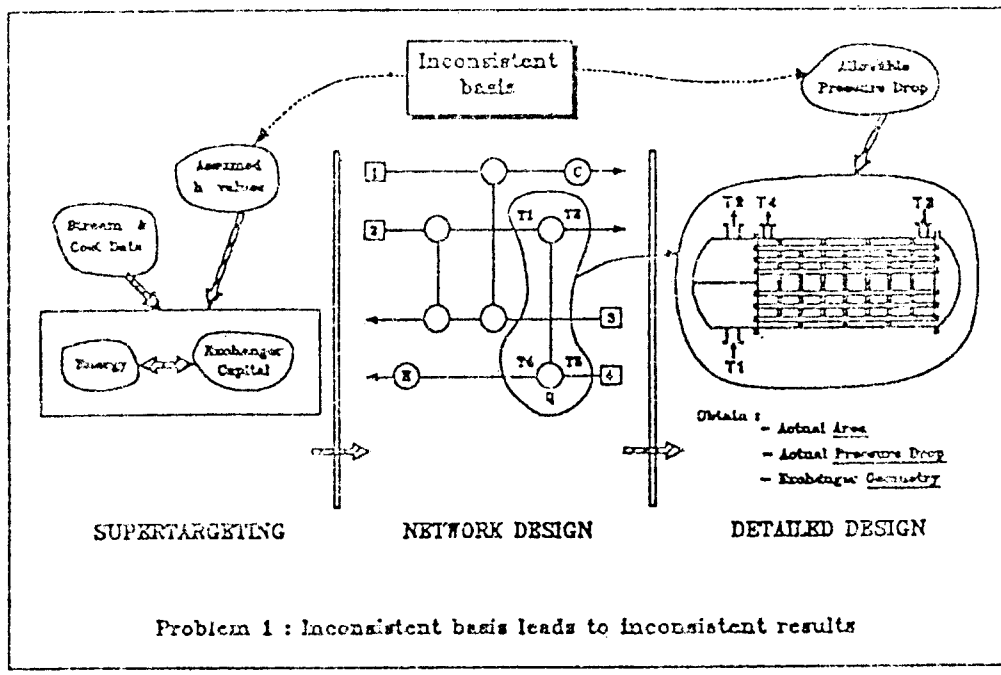
تنها در مرحله سوم یعنی طراحی تفصیلی مورد توجه قرار می‌گرفت. اما نویسنده در این سال نشان داد که تأخیر در بررسی مسئله افت فشار در جریانهای واحد چه در طراحی از پایه و چه در طراحی اصلاحی می‌تواند مشکلات فراوانی را برای واحد ایجاد نماید و حتی صرفه اقتصادی طرح را زیر سئوال ببرد، [7]. از آنجا که طراحی تفصیلی مبدلها براساس افت فشارهای مجاز طرف پوسته و طرف لوله انجام می‌گیرد، هیچگونه تضمینی وجود ندارد که ضرایب انتقال حرارت حاصل در این مرحله با ضرایب مفروض در مراحل هدف‌گذاری و استفاده شده در مرحله سنتز برابر باشد، شکل (۵). این عدم تطابق باعث بروز مشکلاتی در هدف‌گذاری و سنتز می‌گردد که مهمترین آنها عبارتند از:

۱ـ عدم هماهنگی بین سنتز شبکه و طراحی تفصیلی مبدلها در ارتباط با سطح تبادل بدست‌آمده (در طراحی از پایه و طراحی اصلاحی).

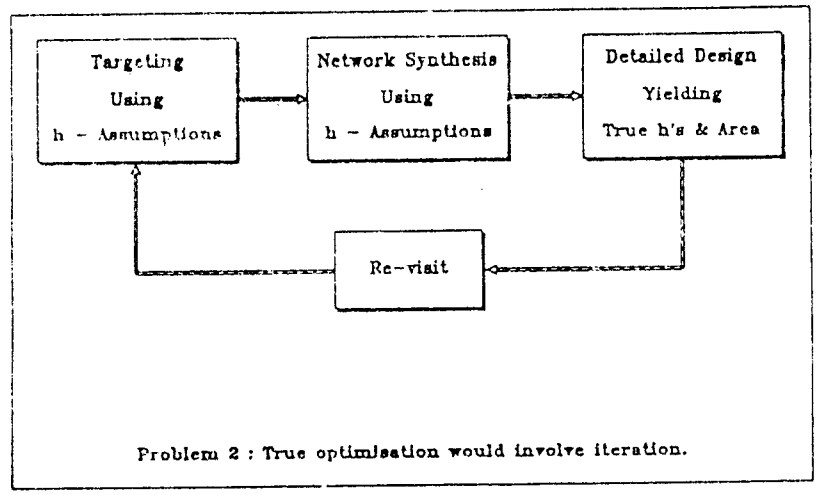
۲ـ مقایسه غیرواقعی بین انرژی و سرمایه و بهینه‌سازی شبکه (در طراحی از پایه).

۳ـ عدم توجه به محدودیت پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود و توان بالقوهٔ آنها و در نتیجه نیاز به تعویض و یا تقویت پمپ‌ها پس از اصلاح شبکه از لحاظ حرارتی (در طراحی اصلاحی).

چنانچه بخواهیم خطای بوجود آمده بدلیل عدم هماهنگی مبناهای طراحی تفصیلی و هدف‌گذاری و سنتز را در شبکه کاهش دهیم مجبور به ایجاد یک الگوریتم تکراری هستیم. این الگوریتم به سادگی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵) ناهمخوانی پایه‌های هدف‌گذاری و طراحی شبکه با طراحی تفصیلی



شکل (۶) نحوه ارتباط فعالیتهای مهندسی جهت طراحی دقیق شبکه مبدلهای حرارتی

اما ایجاد حلقه تکراری مانند آنچه در شکل (۶) پیشنهاد شده است در بسیاری از موارد غیرعملی بوده و بنابراین مرحله هدف‌گذاری و سنتز در روش ضریب انتقال حرارت ثابت با ضرایب اصلاح‌شده مورد بازنگری قرار نمی‌گیرند. برای رفع نارسائیهای فوق توسط نویسنده، روابطی ارائه گردید که ارتباط میان اُفت فشار مجاز جریان، ضریب انتقال حرارت و سطح انتقال حرارت را برقرار می‌نماید،[7]و [8] .

(۳) برای طرف لوله: $\Delta P_t = K_t A h^{3.5}$

(۴) برای طرف پوسته: $\Delta P_s = K_s A h^{4.412}$

از آنجا که مبنای محاسبات در هر دو مورد فوق یکسان است، نتایج حاصل از آنها نیز یکدیگر را تائید می‌کند و به عبارت دیگر سطح محاسبه شده پس از طراحی تفصیلی برابر با سطح بدست آمده در مرحله سنتز بوده و همخوانی کامل با سطح برآورد شده در مرحله هدف‌گذاری دارد،[9].

ج ـ اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی با هدف رفع گلوگاه با فرض ضرایب انتقال حرارت ثابت

اصلاح شبکه با هدف رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش

در روابط فوق K_t و K_s تابع خواص فیزیکی و دبی حجمی سیال می‌باشند.

روابط (۳) و (۴) دارای دو زمینه کاربرد مهم هستند:

۱ـ استفاده در یک الگورتیم برای هدف‌گذاری سطح موردنیاز شبکه برمبنای افت فشار مجاز جریان‌ها در طراحی از پایه و طراحی اصلاحی.

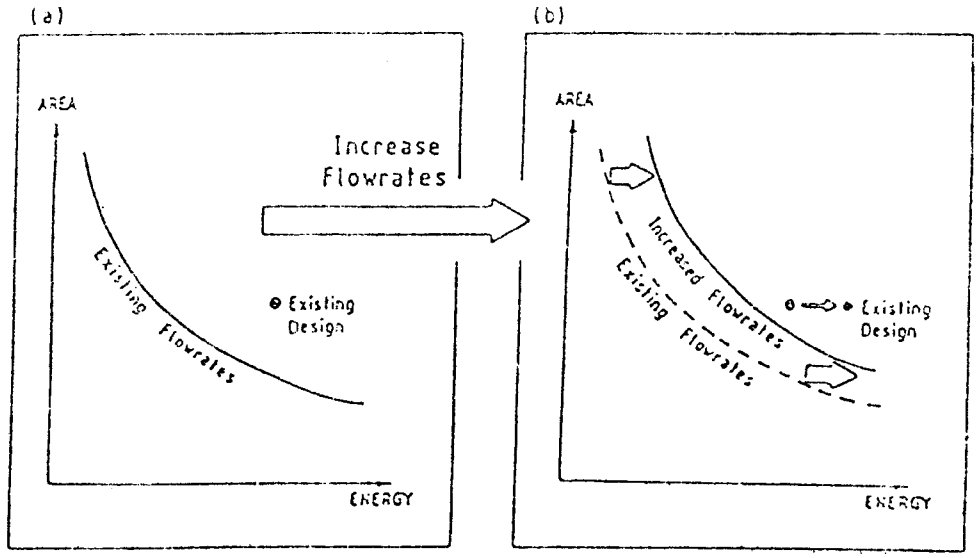
۲ـ استفاده در یک روش طراحی تفصیلی که از تمامی افت فشار قابل دسترس برای جریان در داخل مبدّل استفاده می‌نماید.

ظرفیت و یا اصلاح فرآیند تفاوتهای عمده‌ای با اصلاح شبکه به منظور کاهش مصرف انرژی دارد. هنگامی که شبکه مبدلهای حرارتی یک واحد به منظور کاهش مصرف انرژی اصلاح می‌گردد معمولاً دو عامل اقتصادی، که عبارتند از سقف سرمایه گذاری و زمان بازگشت سرمایه، ملاک تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند. این دو پارامتر که معمولاً توسط کارفرما تعریف می‌شوند میزان کاهش مصرف انرژی را تعیین می‌کنند. در اصلاح باهدف رفع گلوگاه این انتخاب

این مقدار انرژی اضافی و یا بخشی از آن را نداشته باشد، میدان عمل برای کاهش انرژی مصرف مشخص می‌گردد.

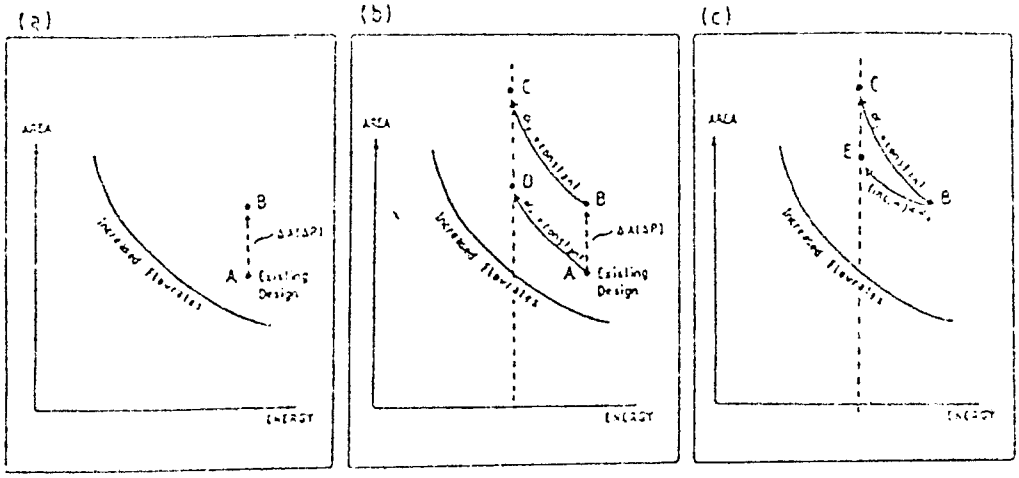
روشی که تا پیش از سال ۱۹۹۰ برای هدف‌گذاری اینگونه پروژه‌ها بکار گرفته می‌شد کاملاً مشابه روش جو و لینهوف بوده و میزان سطح اضافی موردنیاز براساس میزان کاهش انرژی مشخصی که پس از اصلاح واحد و یا افزایش ظرفیت موردنیاز بود، تعیین می‌گردید. میزان کاهش انرژی موردنیاز براساس شبیه‌سازی عملکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت صورت می‌گرفت و ضرایب انتقال حرارت مفروض باتوجه به افزایش و یا کاهش دبی جریان تصحیح می‌گردیدند.

اهمیت درنظر گرفتن محدودیتهای دینامیکی واحد در پروژه‌های اصلاح به منظور رفع گلوگاه، بدلیل افزایش دبی جریانها که از یک سو باعث افزایش افت فشار در داخل مبدلها و از سوی دیگر باعث تغییر نقطه عملکرد پمپ وکاهش فشار قابل تأمین از سوی آن می‌گردد باعث گردید تا در سال ۱۹۹۰ پلی[1] و احمد[2] برای اولین بار و باتوجه به نتایج تحقیقات جیگده[3] در مورد نحوه ارتباط ضریب انتقال حرارت، افت فشار و سطح انتقال حرارت در داخل لوله و با تعمیم دادن آن به داخل پوسته به‌طور نسبی ضرایب انتقال حرارت مفروض را باتوجه به افت فشارهای قابل‌دسترسی تصحیح نمایند. اما کماکان بدلیل در دسترس‌نبودن روشی صحیح، هدف‌گذاری کماکان برمبنای ضرایب انتقال حرارت ثابت انجام می‌گرفت. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب نحوه تعیین محل شبکه فعلی پس از افزایش ظرفیت و یا اصلاح واحد و نحوه تعیین سطح اضافی موردنیاز جهت غلبه بر محدودیت‌های افت فشار و نیز کاهش مصرف انرژی را نشان می‌دهد، [10].



شکل (۷) منحنی ایده‌آل سطح ـ انرژی پس از افزایش دبی جریانها و نحوه تعیین محل قرارگیری شبکه موجود پس از افزایش ظرفیت

1- Polley 2- Ahmad 3- Jegede



شکل (۸) نحوه تعیین سطح اضافی موردنیاز

هدف‌گذاری با درنظر گرفتن کامل محدودیت‌های دینامیکی واحد

چنانکه اشاره شد روشهای پیشین برای هدف‌گذاری به منظور برآورد سطح موردنیاز و ΔT_{min} مربوطه در پروژه‌های اصلاح با هدف رفع گلوگاه یا بطور کلی از محدودیت دینامیکی واحد در مرحله هدف‌گذاری صرفنظر کرده و یا تنها به شکلی بسیار ابتدایی به تصحیح ضرایب انتقال حرارت مفروض و ثابت و استفاده از ضرایب تصحیح شده در الگوریتم برآورد سطح اکتفاء می‌نمایند.

در روش جدید هدف‌گذاری، کلیه محدودیت‌های حرارتی و دینامیکی در تمامی مراحل درنظر گرفته شده و منحنی‌های هدف‌گذاری براساس افت فشار ثابت و مجاز جریانها (بجای استفاده از ضرایب انتقال حرارت مفروض) رسم شده‌اند. همچنین جهت برآورد سطح اضافی موردنیاز جهت انتقال حرارت از الگوریتم پیشنهادی قبلی [9] و با انجام اصلاحاتی به منظور بکارگیری در پروژه‌های اصلاح با هدف رفع گلوگاه استفاده شده است. به دلایل فوق نتایج بدست‌آمده در پایان مرحله هدف‌گذاری با نتایج حاصل از سنتز و بهینه‌سازی و نیز طراحی تفصیلی مبدلها مطابقت کامل داشته و بنابراین هیچگونه نارسائی در ارتباط با عملکرد پمپها و کمپرسورها و نیز کوره‌ها در شبکه وجود نخواهد داشت.

چنانکه می‌توان پیش‌بینی نمود، اولین قدم برای انجام هدف‌گذاری به منظور رفع گلوگاه شبیه‌سازی عملکرد کامل فرایند پس از افزایش خوراک و یا اصلاح فرایند است. افزایش خوراک ورودی و یا اصلاح جداسازها و راکتورها نه‌تنها باعث افزایش دبی جریانهای خروجی می‌گردد (و این افزایش در اغلب مواقع در تمامی جریانهای خروجی یکسان نیست) بلکه دما، فشار و حتی در بعضی شرایط درصد ترکیبات موجود در جریانهای خروجی را تغییر می‌دهد. از طرف دیگر، تغییر شرایط فوق علاوه بر تغییر میزان حرارت موجود در هر جریان[1]، بر روی خواص فیزیکی جریان مانند ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته، دانسیته و ضریب هدایت حرارتی تأثیر گذاشته و در نتیجه تأثیر مستقیم بر روی عملکرد مبدلها و از آنجا بر روی راندمان شبکه موجود پس از افزایش ظرفیت خواهد داشت. تغییر خواص فیزیکی در پروژه‌های اصلاح به منظور رفع گلوگاه یکی دیگر از وجوه

1- Heat Content

تمایز اینگونه پروژه‌ها نسبت به پروژه‌های اصلاح با هدف صرفه‌جویی انرژی بوده و برآورد این خواص برای جریانهای فرایند در محدوده‌های دمایی جدید یکی از مراحل حساس و بسیار تأثیرگذار در آماده‌سازی اطلاعات است. پس از انجام شبیه‌سازی عملکرد جداسازها و راکتور پس از افزایش ظرفیت، مراحل ذیل جهت برآورد سطح اضافی موردنیاز انجام می‌گیرد.

۱ـ گردآوری اطلاعات[1]

در این مرحله اطلاعات لازم برای انجام هدف‌گذاری با درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار گردآوری می‌گردد. این اطلاعات عبارتند از:

ـ اطلاعات جریان: شامل دبی جرمی جریان، دماهای ابتدایی و انتهایی، حداکثر افت فشار قابل دسترس[2] که صرف انتقال حرارت می‌گردد، خواص فیزیکی سیال و ضریب کثیفی جریان که در شرایط عملکرد پایدار[3] واحد برآورد می‌گردند. لازم بذکر است که تعیین حداکثر افت فشار مجاز جریانها تنها با Rating مبدلها و در دست داشتن منحنی مشخصه پمپ و نیز اطلاع دقیق از ساختار خطوط لوله و میزان افت فشار مصرفی جهت انتقال سیال امکانپذیر است.

اطلاعات مبدلها[4]: شامل اطلاعات مربوط به هندسهٔ مبدلها جهت تعیین سطح مبدلهای نصب شده در شبکه به منظور محاسبه راندمان شبکه موجود در مرحله هدف‌گذاری و نیز برآورد افت فشاری که صرف انتقال حرارت می‌گردد.

اطلاعات پمپ‌ها و کمپرسورها: در پروژه‌های اصلاح به منظور رفع گلوگاه بدلیل تغییر دبی جریانها نقطه عملکرد و راندمان پمپ‌ها و کمپرسورها تغییر نموده و میزان افت فشار قابل تأمین توسط پمپ‌ها و کمپرسورها در اغلب انواع آنها با افت فشار قابل تأمین پیش از افزایش و یا کاهش دبی جریانها متفاوت است. به همین دلیل اطلاع از منحنی مشخصه پمپ‌ها و سایر اطلاعات موردنیاز در مورد ساختمان آنها درجهت بهبود راندمان آنها در این مرحله ضروری است.

اطلاعات هزینه‌ها[5]:

که شامل اطلاعات هزینه نصب مبدل و پوسته اضافی، هزینه افزایش سطح در شبکه، هزینه انرژی مصرفی در کوره‌ها، هزینه آب خنک‌کننده و هزینه انرژی الکتریکی مصرفی در پمپ‌ها، کمپرسورها و فنها[6] که برای برآورد اقتصادی پروژه و تعیین سرمایه گذاری لازم ضروری است، می‌باشد.

۲ـ فراوری اطلاعات[7]

در این مرحله Rating مبدلها به منظور تعیین افت فشاری که در مبدلها صرف انتقال حرارت می‌گردد و نیز تعیین ضریب کثیفی جریانهای فرایند صورت می‌گیرد. این عمل با کمک الگوریتم پیشنهادی نویسنده [8] و برمبنای روش Bell-Delaware انجام می‌گیرد. در انتهای این مرحله شبکه مبدلهای حرارتی[8] رسم و میزان بار مبدلها، کولرها، کوره‌ها، دماهای ورودی و خروجی و همچنین افت فشار مربوط به هر جریان بر روی آن مشخص می‌گردد.

۳ـ شبیه‌سازی افزایش ظرفیت در شبکه مبدلهای حرارتی

در این مرحله عملکرد پمپ‌ها، کمپرسورها و مبدلهای موجود در شبکه تحت شرایط جدید دبی، دما و فشار و با کمک ضرایب کثیفی بدست‌آمده در مرحله قبل پس از افزایش ظرفیت شبیه‌سازی می‌شوند تا عملکرد هر یک بطور دقیق مشخص و نیز بار مبدلها و دمای جریانها خروجی از هر یک از آنها مشخص گردد. واضح است که بدلیل افزایش دبی و

1- Data Gathering
2-Allowable Pressure Drop
3- Steady State Operation
4- Heat Exchanger Data
5- Cost Data
6- Air Coolers
7- Data Processing
8- Grid Representation

تغییر شرایط دمایی فرایند میزان حرارت لازم برای رسانیدن هر جریان به دمای نهایی با آنچه پیش از افزایش ظرفیت مورد نیاز بوده، متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب با تعیین میزان انرژی اضافی موردنیاز برای رسانیدن جریانهای سرد به دمای نهایی موردنظر و به عبارت دیگر با تعیین اضافه بار اعمال شده بر روی کوره‌ها، میزان صرفه‌جویی در انرژی لازم برای کاهش بار کوره‌ها تا حد مجاز تعیین می‌گردد.

نتیجه دیگر شبیه‌سازی عملکرد مبدلها با دبی‌های افزایش‌یافته تعیین افت فشاری است که در این حالت صرف انتقال حرارت می‌گردد. همچنین با تعیین نقطه جدید عملکرد پمپها/کمپرسورها پس از افزایش ظرفیت که در اغلب مواقع نقطه‌ای با راندمان کمتر و در نتیجه افت فشار قابل دسترس کمتر خواهد بود، حداکثر افت فشار قابل دسترسی پس از افزایش ظرفیت برای هر جریان تعیین می‌گردد و بنابراین فاصله میان افت فشار موردنیاز (شبیه‌سازی شده) و افت فشار قابل تأمین (به دلیل تغییر نقطه عملکرد پمپ) تعیین می‌گردد. این دو افت فشار در مورد هر جریان در مرحله هدف‌گذاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

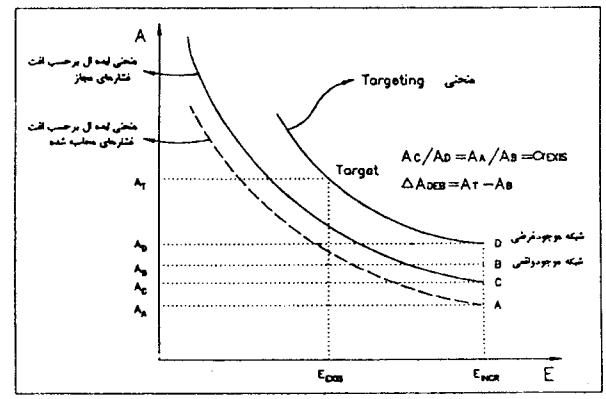
۴ـ رسم منحنی انرژی ـ سطح بدون توجه به محدودیتهای افت فشار و تعیین راندمان شبکه موجود

در این مرحله منحنی انرژی ـ سطح با کمک اطلاعات جریان و باتوجه به افت فشارهای موردنیاز که توسط شبیه‌سازی مبدلها تحت دبی‌های افزایش‌یافته حاصل شده است، با استفاده از الگوریتم برآورد سطح برمبنای افت فشارهای ثابت رسم می‌گردد. رسم این منحنی درواقع با فرض این نکته انجام گرفته است که سیستم دینامیکی واحد محدودیتی از لحاظ تأمین افت فشار اضافی موردنیاز ندارد و تنها گلوگاه موجود در شبکه گلوگاه حرارتی (محدودیت بار حرارتی کوره‌ها) می‌باشد. منحنی که بدین ترتیب رسم می‌شود درواقع مشابه منحنی انرژی ـ سطح در پروژه‌های صرفه‌جویی در انرژی است که در آنها افت فشار قابل دسترس پیش و پس از اصلاح تفاوتی نمی‌کند. اکنون باتوجه به میزان سطح موجود در شبکه فعلی و مصرف انرژی پس از افزایش ظرفیت می‌توان وضعیت شبکه فعلی و از آنجا راندمان شبکه موجود را پس از افزایش ظرفیت در صورت عدم وجود محدودیت دینامیکی برآورد نمود.

۵ـ رسم منحنی انرژی ـ سطح برای دبیهای افزایش‌یافته و باتوجه به محدودیت‌های افت فشار

در این مرحله منحنی انرژی ـ سطح برای اطلاعات جریان با دبی‌های افزایش‌یافته و باتوجه به حداکثر افت فشارهای قابل تأمین توسط پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود پس از افزایش ظرفیت که در مرحله دو محاسبه گردید رسم می‌گردد. این منحنی حتماً در بالای منحنی رسم شده برای افت فشارهای موردنیاز می‌باشد. زیرا کاهش افت فشار قابل دسترس باعث کاهش ضریب انتقال حرارت و درنهایت باعث افزایش سطح می‌گردد، شکل (۹). اکنون باید دید اگر قرار باشد شبکه‌ای با این افت فشارها دارای راندمانی به اندازه راندمان شبکه‌ای با افت فشار موردنیاز باشد، چه میزان سطح باید بر روی آن قرار بگیرد. به عبارت دیگر با درنظر گرفتن یک سطح فرضی برای شبکه‌ای که دارای میزان ثابتی از مصرف انرژی بوده و افت فشارهای قابل دسترسی آن کاهش پیدا کرده است میزان اضافه سطح برای غلبه بر محدودیتهای افت فشار تعیین می‌گردد. باتوجه به شکل (۹) و در دست داشتن سطح ایده‌آل بر روی منحنی و نیز راندمان بدست‌آمده برای شبکه موجود بدون درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار می‌توان نقطه‌ای را بر روی شکل مشخص کرد که دارای

سطح فرضی A_D بوده و در حقیقت سطح اضافی لازم برای غلبه بر محدودیت‌های افت فشار در میزان مصرف انرژی ثابت (پیش از کاهش مصرف تا حداکثر مجاز) را نشان می‌دهد. اکنون با در دست داشتن نقطه A_D و راندمان شبکه $\alpha_{existing}$، می‌توان به رسم منحنی هدف‌گذاری پرداخت.



شکل (۹) منحنی‌های ایده‌آل انرژی ـ سطح و منحنی هدف‌گذاری به منظور برآورد سطح موردنیاز

۶ـ رسم منحنی هدف‌گذاری از نقطه D

رسم این منحنی به یکی از دو صورت راندمان ثابت و راندمان افزایشی صورت می‌گیرد. باید به این نکته توجه نمود که چنانچه $\alpha_{existing}$ < ۰/۹ بوده و از روش راندمان افزایشی استفاده شود، علاوه بر کاهش مصرف انرژی در هیترها و کاهش آن تا حد مجاز بدون ایجاد تغییر در سیستم دینامیکی واحد، راندمان استفاده از سطح نیز در شبکه بهبود یافته و بدین ترتیب باعث افزایش راندمان حرارتی واحد نیز می‌گردد.

۷ـ برآورد سطح اضافی موردنیاز

اکنون با استفاده از سطح تعیین‌شده توسط منحنی هدف‌گذاری بر روی خطی که دارای مصرف مجاز انرژی در کوره‌ها باشد، میزان سطح موردنیاز برای اصلاح شبکه جهت رفع گلوگاه بدون نیاز به ایجاد تغییر و یا تعویض پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود تعیین می‌گردد.

میزان سطح اضافی موردنیاز در حقیقت تفاوت میزان سطح برآورد شده و سطح موجود در شبکه است:

$$\Delta A_{DEB} = A_T - A_B \qquad (۵)$$

پس از این مرحله می‌توان با توجه به روابط موجود میزان سرمایه گذاری لازم برای نصب سطوح جدید و اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی را انجام داد.

شکل (۱۰) الگوریتم جدید هدف‌گذاری برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه را با درنظر گرفتن محدودیت‌های دینامیکی واحد نشان می‌دهد، [11].

مسئله نمونه

یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش ارائه‌شده، اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور افزایش ظرفیت پالایشگاهها است. از آنجا که قیمت پمپ‌های موجود در اینگونه واحدها خصوصاً پمپ نفت‌خام بسیار گران می‌باشد، این روش می‌تواند کمک مؤثری در جهت پرهیز از تعویض و تقویت پمپ‌های موجود علیرغم افزایش ظرفیت جریانها باشد.

شبکه انتخاب شده بعنوان مسئله نمونه در سال ۱۹۹۲ توسط نویسنده به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و با روش افت فشارهای ثابت هدف‌گذاری و طراحی اصلاحی گردیده است. هدف از اصلاح شبکه در این مسأله رفع گلوگاه‌های حاصل از ۲۰٪ افزایش خوراک ورودی به پالایشگاه است. از آنجا که منظور از هدف‌گذاری و طراحی اصلاحی شبکه مزبور بررسی میزان دقت و کارآیی روش ارائه شده می‌باشد فرض‌های ساده‌کننده زیر در نظر گرفته شده است:

۱ـ افزایش دبی خوراک ورودی به میزان ۲۰٪ باعث

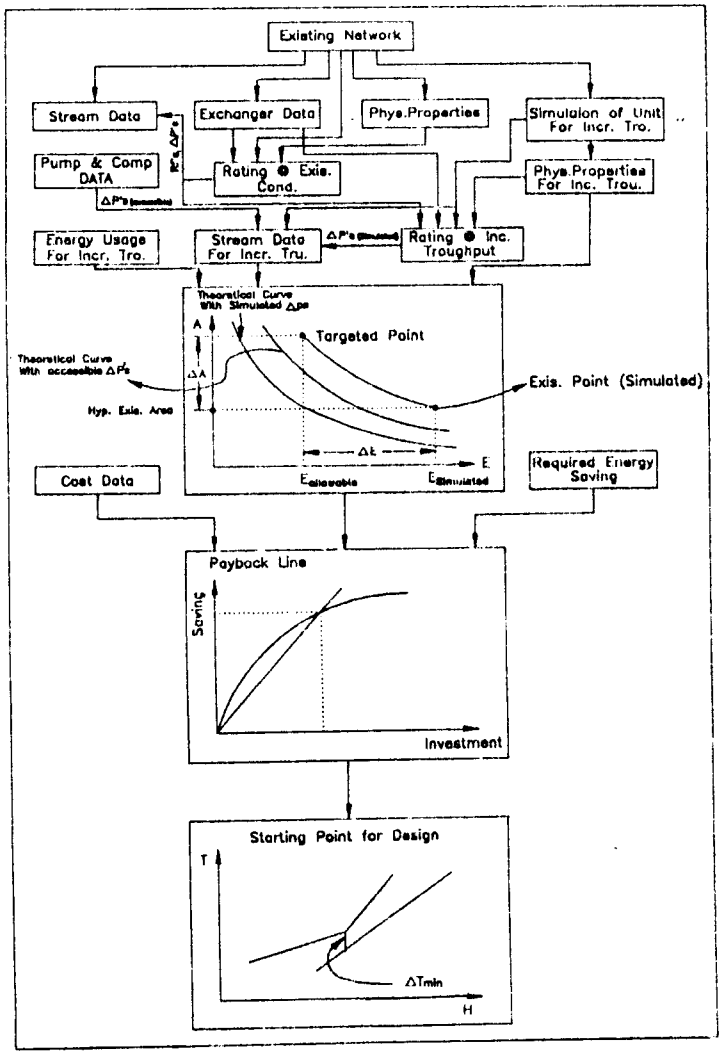
افزایش دبی جریانهای خروجی، هر یک به اندازه ۲۰٪ می‌گردد.

۲ـ هیچگونه محدودیت هیدرودینامیکی در برجها و سایر تجهیزات فرایندی وجود ندارد و بنابراین هیچ گلوگاهی در قسمتهای مربوط به جداسازی دیده نمی‌شود.

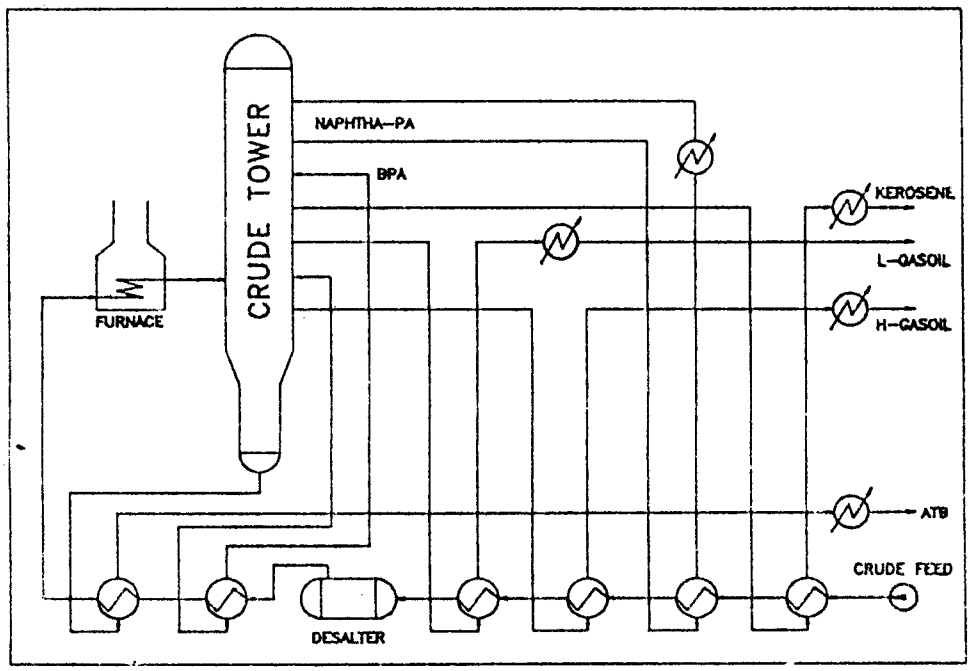
۳ـ افزایش دبی نفت خام ورودی هیچگونه تغییری در دما، فشار، درصد ترکیب و خواص فیزیکی برش‌ها ایجاد نمی‌نماید.

۴ـ از آنجا که منحنی مشخصه پمپهای موجود در این واحد در دسترس نمی‌باشد، فرض شده است که ۲۰٪ افزایش دبی برای هر جریان باعث کاهش افت فشار قابل تأمین توسط پمپ‌ها به میزان ۲۰٪ می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که باتوجه به فرم منحنی‌های مشخصه در بدترین حالت ممکن، افزایش دبی جریان به میزان ۲۰٪ حداکثر باعث کاهش افت فشار قابل تأمین به میزان ۱۰٪ می‌گردد. اما در اینجا برای نشان‌دادن این نکته که روش ارائه شده حتی در بسته‌ترین و محدودترین شرایط نیز کارآیی لازم را دارا باشد، کاهش افت فشار قابل تأمین به میزان ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.

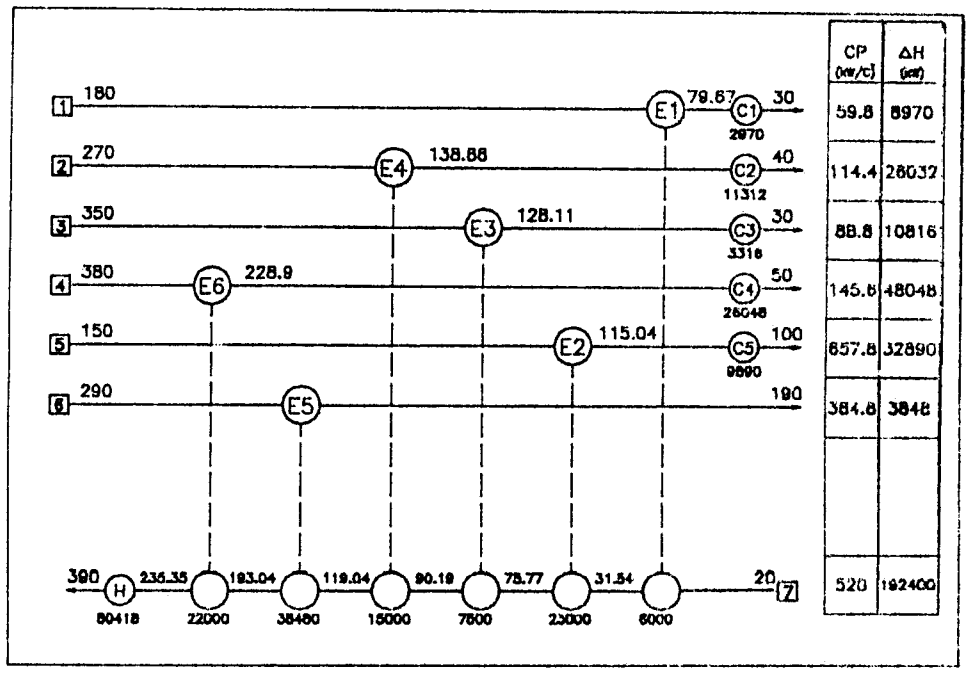
دیاگرام ساده شده واحد در شکل (۱۱) دیده می‌شود. همانگونه که در شکل دیده می‌شود جریان نفت خام ورودی توسط دو ردیف مبدل حرارتی و با کمک حرارت ناشی از برشهای مختلف خروجی از برج تقطیر گرم می‌شود. شبکه مبدلهای حرارتی واحد شامل ۶ جریان گرم و ۱ جریان سرد در شکل (۱۲) با کلیه جزئیات حرارتی موردنیاز ارائه شده است.



شکل (۱۰) الگوریتم جدید هدف‌گذاری برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با درنظر گرفتن محدودیتهای دینامیکی واحد



شکل (۱۱) دیاگرام ساده‌شده واحد تقطیر



شکل (۱۲) شبکه مبدلهای حرارتی واحد تقطیر

همچنین مشخصات مبدلهای واحد، دبی و خواص فیزیکی جریانهای واحد و اطلاعات هزینه‌ها به ترتیب در جداول (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده است.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Shell side	Kero.	Nqph.	HGO	LGO	BPA	ATB
Tube side	Crude	Crude	Crude	Crude	Crude	Crude
Area (m^2)	280	1480	280	800	2760	1360
Ser x Par	1 x 1	1 x 1	1 x 1	2 x 1	3 x 2	4 x 1
Shell ID (mm)	940	1524	940	1143	1219	1143
Baffle Spacing	255.3	1246.4	197.3	419.3	605.1	509.1
Tube Count	1075	2827	1075	1590	1810	1590
Tube Passes	2	2	2	2	2	2
Tube ID (mm)	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
Tube OD (mm)	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1
Tube Pitch (mm)	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4

جدول (۱) مشخصات مبدلهای واحد تقطیر

St. No.	Stream Name	Flow (kg/s)	ρ (kg/m^3)	Cp (J/kg °C)	μ (cP)	k (W/m °C)
1	Kerosene	23	700	2600	0.3	0.12
2	LGO	44	700	2600	0.4	0.12
3	HGO	13	750	2600	0.5	0.12
4	ATB	56	750	2600	0.5	0.12
5	Naphtha	253	630	2600	0.2	0.12
6	BPA	148	750	2600	0.4	0.12
7	Crude	200	800	2600	1.0	0.12

جدول (۲) دبی و خواص فیزیکی جریانهای واحد تقطیر

Cost Data	
Hot Utility:	70£/kW.yr
Cold Utility:	7£/kW.yr
Exchanger Capital:	$8600+670(Area)^{0.83}$

جدول (۳) اطلاعات هزینه‌ها

اطلاعات موردنیاز برای تکمیل اطلاعات جریان به کمک Rating مبدلهای واحد حاصل می‌گردد. نتایج Rating مبدلها و نیز اطلاعات جریان پیش از افزایش ظرفیت در جدول (۴) و (۵) ارائه شده است.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
h_i (W/m^2 °C)	1947.2	898.0	1947.2	1422.6	736.6	1422.6
h_o (W/m^2 °C)	1690.2	2432.9	1144.6	1485.6	1577.8	1419.7
ΔP_t (k P_a)	32.835	11.560	32.835	31.272	10.776	53.164
ΔP_s (k P_a)	45.634	65.363	29.476	59.886	74.763	85.964
R_{fi} (m^2 °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142
R_{fo} (m^2 °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142

جدول (۴) نتایج حاصل از Rating مبدلها پیش از افزایش ظرفیت

Stream No.	Stream Name	Clean HTC (W/m^2 °C)	Fouling (m^2 °C/W)	HTC (W/m^2 °C)	ΔP (k P_a)
1	Kerosene	1690.2	0.00144	492.2	45.634
2	LGO	1485.6	0.00142	477.8	59.886
3	HGO	1144.6	0.00140	439.8	29.476
4	ATB	1419.7	0.00142	470.7	85.964
5	Naphtha	2432.9	0.00137	561.5	65.363
6	BPA	1348.4	0.00157	432.6	74.763
7	Crude	1135.2	0.00147	343.0	172.442

جدول (۵) اطلاعات جریانهای واحد پیش از افزایش ظرفیت

در مرحله بعد برای تعیین بار حرارتی و وضعیت مبدلهای موجود از لحاظ دمای خروجی جریان‌ها و افت فشارهای حاصل از افزایش دبی جریانها در مبدلها، Rating مبدلهای موجود با دبی‌های افزایش‌یافته صورت می‌گیرد. خلاصه نتایج Rating در جدول (۶) ارائه شده است. با مقایسه نتایج Rating پیش و پس از افزایش ظرفیت دیده می‌شود، همانگونه که انتظار می‌رفت، افت فشار درون مبدلها افزایش پیدا کرده و به همین علت ضرایب انتقال حرارت در هر طرف نیز افزوده شده است. همچنین اطلاعات جریانهای واحد پس از افزایش ظرفیت در جدول (۷) ارائه شده است.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
h_i (W/m² °C)	2252.956	1039.007	2252.956	1646.033	852.294	1646.033
h_o (W/m² °C)	1931.884	2756.495	1318.001	1685.94	1788.888	1603.839
ΔP_t (k P_a)	45.589	16.051	45.589	43.420	14.964	73.816
ΔP_s (k P_a)	67.591	94.372	44.627	86.868	108.177	123.052
R_{fi} (m² °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142
R_{fo} (m² °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142

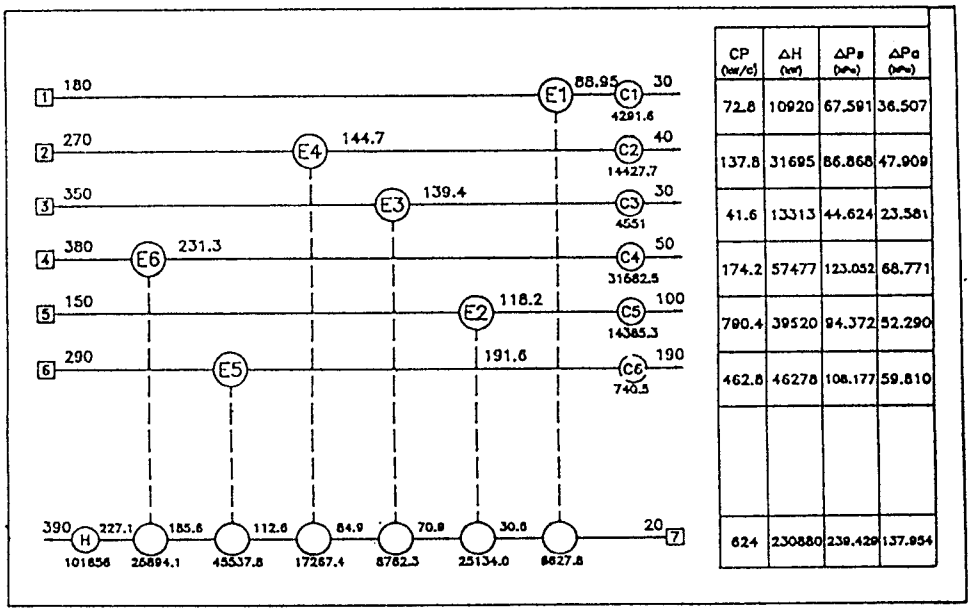
جدول (۶) نتایج حاصل از Rating مبدلها پس از افزایش ظرفیت

Stream No.	Stream Name	Clean HTC (W/m² °C)	Fouling (m² °C/W)	HTC (W/m² °C)	ΔP (k Pa)
1	Kerosene	1931.884	0.00144	510.822	67.591
2	LGO	1685.94	0.00142	496.736	86.868
3	HGO	1318.001	0.00140	463.236	44.624
4	ATB	1603.839	0.00142	489.356	123.052
5	Naphtha	2756.495	0.00137	577.107	94.372
6	BPA	1788.888	0.00157	469.703	108.177
7	Crude	1444.96	0.00147	372.9	239.429

جدول (۷) اطلاعات جریانهای واحد تقطیر پس از افزایش ظرفیت

شکل (۱۳) شبکه مبدلهای حرارتی واحد را پس از افزایش ظرفیت نشان می‌دهد. چنانکه در شکل دیده می‌شود بار کوره H از حداکثر مجاز در وضع موجود (۸۰۴۱۸ kw) به (۱۰۱۶۵۶ kw) افزایش خواهد یافت (دمای ورودی به کوره H از ۲۳۵/۴°c به ۲۲۷/۱°c کاهش پیدا کرده است) و این مسأله باعث بوجودآمدن اولین گلوگاه در مقابل افزایش ظرفیت می‌گردد.

همچنین باتوجه به ستون آخر جدول رسم‌شده در شکل (۱۳) که نشان‌دهنده حداکثر افت فشار قابل تأمین توسط پمپهای موجود پس از افزایش ظرفیت است، دیده می‌شود که این افت فشارها مقدار قابل توجهی کمتر از افت فشارهای محاسبه‌شده در Rating مبدلها است و بنابراین گلوگاه دوم در سیستم دینامیکی شبکه پدید می‌آید.



CP (kw/c)	ΔH (kw)	ΔPs (kPa)	ΔPa (kPa)
72.8	10920	67.591	36.507
137.8	31695	86.868	47.909
41.6	13313	44.624	23.581
174.2	57477	123.052	68.771
790.4	39520	94.372	52.290
462.8	46278	108.177	59.810
624	230880	239.429	137.954

شکل (۱۳) شبکه مبدلهای حرارتی واحد تقطیر پس از افزایش ظرفیت

در این مرحله با تعیین میزان اضافه بار کوره و نیز مشخص‌شدن محدودیت‌های دینامیکی شبکه و باتوجه به سطح تبادل حرارت موجود در شبکه ($6960\ m^2$)، مطابق با روش پیشنهادی ابتدا راندمان شبکه موجود، $\alpha_{existing}$، تعیین شده و با انتخاب منحنی هدف‌گذاری راندمان ثابت (بدلیل وجود محدودیت در شبکه از لحاظ افت فشار امکان بهبود راندمان شبکه بسیار ضعیف است) میزان سطح موردنیاز و از آنجا میزان سطح اضافی موردنیاز برآورد می‌گردد. نتایج نهایی هدف‌گذاری با روش فوق در جدول (۸) ارائه شده است.

Retrofit for Debottlenecking Point Target			
Min. Temp. Diff.	58 °C	Minimum 1-2 Area	10984.8 m^2
Cold Utility (Simulated)	69980 kW	Target Area	12313.7 m^2
Hot Utility (Simulated)	101656 kW	Existing Area	6960 m^2
Utility Reduction	21238 kW	Eguivalent 1-1 Area	6820 m^2
Hot Utility after Deb.	80418 kW	Additional Area	5353.7 m^2
Cold Utility after Deb.	48750 kW	Constant Alpha	0.892
Utility Saving	1635326 £/yr	Area Cap. Cost	1416809 £/yr
	Pay Back	0.87 year	

جدول (۸) نتایج نهایی هدف‌گذاری با توجه به محدودیت‌های افت فشار

برای مقایسه این روش با روش مبتنی بر ضرایب انتقال حرارت ثابت (تصحیح‌شده برای دبی‌های افزایش‌یافته) شبکه را یکبار دیگر و باکمک ضرایب انتقال حرارتی که توسط Rating مبدلهای موجود تحت دبی‌های افزایش یافته بدست آمده است تکرار می‌کنیم. خلاصه نتایج این هدف‌گذاری در جدول (۹) ارائه شده است.

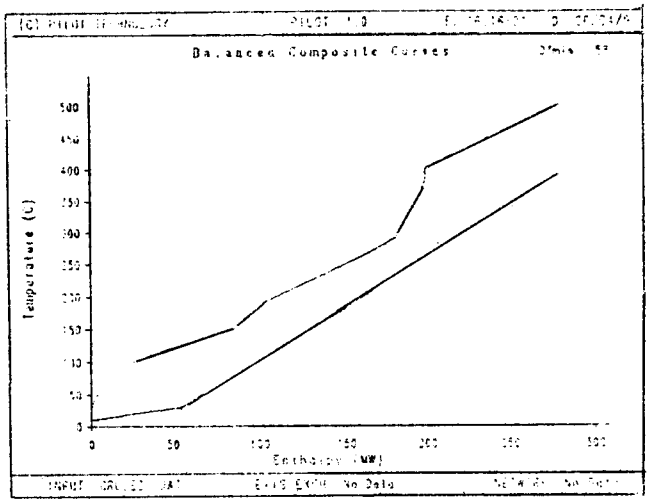
Retrofit for Debottlenecking Point Target			
Min. Temp. Diff.	58 °C	Minimum 1-1 Area	10013.2 m^2
Cold Utility (Simulated)	69980 kW	Target Area	10954.0 m^2
Hot Utility (Simulated)	101656 kW	Existing Area	6960 m^2
Utility Reduction	21238 kW	Eguivalent 1-1 Area	6820 m^2
Hot Utility after Deb.	80418 kW	Additional Area	4134.0 m^2
Cold Utility after Deb.	48750 kW	Constant Alpha	0.914
Utility Saving	1635326 £/yr	Area Cap. Cost	1054376 £/yr
	Pay Back	0.645 year	

جدول (۹) نتایج هدف‌گذاری برای رفع گلوگاه حاصل از افزایش ظرفیت به روش h ثابت

قابل توجه است، از آنجا که ضرایب انتقال در این روش با کمک رابطه $\Delta P = K A h^m$ و با استفاده از الگوریتمی که براساس روش Bell - Delaware برای استفاده از حداکثر افت فشار موجود تهیه گردیده است انتخاب شده، بهترین انتخاب برای ضرایب انتقال بوده و بنابراین نتایج بدست‌آمده بهترین نتایج ممکن در روش h ثابت است. نتایج بدست‌آمده از این دو روش، همانگونه که انتظار می‌رفت، نشان می‌دهند که سطح اضافی موردنیاز در روش «h ثابت» حدود ۱۲۰۰ مترمربع کمتر پیش‌بینی شده است.

این تفاوت نشان می‌دهد اگر بخواهیم پمپ‌های موجود دست‌نخورده باقی بمانند باید کاهش ضرایب انتقال حرارت ناشی از ازدیاد سطح را با ازدیاد سطح مجدد جبران نمود. در غیر این صورت پس از پایان طراحی و محاسبه افت فشارهای جدید به این نتیجه خواهیم رسید که بعضی یا همه پمپ‌ها و کمپرسورها باید تعویض و یا تقویت شوند، [11].

شکل (۱۴) منحنی‌های مرکب را برای شبکه فوق نشان می‌دهد. اکنون با در دست‌داشتن $\Delta T_{min} = 58^{\circ}c$ در آغاز مرحله طراحی هستیم.



شکل (۱۴) منحنی .B.C.C برای جریانهای موجود در واحد در $\Delta T_{min} = 58^{\circ}c$

مراحل مختلف طراحی و نتایج حاصل از آن و نیز مقایسه نتایج مرحله هدف‌گذاری و طراحی با یکدیگر در مقاله شماره ۲ ارائه گردیده است.

فهرست منابع

۱ـ مهران غفوریان صدیق

«مروری جامع بر روشهای اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی»،

سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۷۳.

2- Tjoe T. N. & Linnhoff B., 'Using Pinch Technology for Process Retrofit', Chem. Eng., April 28 1986.

3- Tjoe T. N. & Linnhoff B, 'Achieving the Best Energy Saving Retrofit', AICHE Annual Meeting, Houston, March 29 - April 4, 1987.

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

5-Townsend D. W. & Linnhoff B., 'Surface Area Annual Meeting of IchemE. U.K., April Targets for H.E.N.',1984.

6- Silangawa M., Area Surface Various of'Evolution Retrofits', M.Sc.Dissertation, UMIST, Efficiency Criteria in H.E.N. 1986.

7- Polley G. T., Panjeh Shahi M. H. & Jegede F. O., 'Pressure Drop Consideration in the Retrofit of H.E.N.', Tran. IchemE, Vol. 68, Part A, May 1990.

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

9-Panjeh Shahi M. H., 'Pressure drop Consideration in Process Integration', Thesis, Ph.D. UMIST , Feb 1992.

10- Ahmad S. & Polley. T., of H.E.N.' , AICHE Spring Meeting,G'Debottlenecking Houston, April 1989.

۱۱ـ مهران غفوریان صدیق

« اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار»،

پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران ، آبان ۱۳۷۳.

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