

اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی طراحی شده به روش PDM به منظور کاهش مصرف انرژی پس از افزایش ظرفیت

محمدحسن پنجه‌شاهی، نسیم طاهونی، محمد لطیفی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

از فن‌آوری پینچ در طراحی اصلاحی شبکه مبدل‌های حرارتی به دو منظور استفاده می‌شود که عبارتند از: اصلاح شبکه به منظور صرفه‌جویی در مصرف انرژی و نیز اصلاح شبکه به منظور رفع گلوگاه‌های حاصل از افزایش ظرفیت. تمامی شبکه‌هایی که تاکنون مطالعات اصلاحی آنها انجام شده است، شبکه‌هایی بوده‌اند که قبلاً براساس روش‌های دیگری بغیر از روش‌های فن‌آوری پینچ طراحی شده‌اند. در این مقاله، اصلاح شبکه‌های مبدل حرارتی که از پیش براساس فن‌آوری پینچ طراحی شده‌اند ولی به دلیل افزایش ظرفیت نیاز به اصلاح دارند مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، ابتدا با بررسی وضعیت چنین شبکه‌هایی پس از افزایش ظرفیت و اینکه چه تغییراتی در آنها ایجاد می‌شود، روش مناسب هدف‌گذاری جهت رفع گلوگاه‌های حاصل از افزایش ظرفیت در آنها تعیین گردیده و سپس جهت بررسی صحت مطالب بیان شده، نتایج هدف‌گذاری و طراحی اصلاحی یک مسأله موردی براساس افت فشار بهینه جریان‌ها ارائه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: فن‌آوری پینچ، شبکه مبدل‌های حرارتی، منحنی مرکب، هدف‌گذاری، منحنی انرژی، سطح، گلوگاه‌های دینامیکی و حرارتی، منحنی نیروی رانش، تحلیل باقی‌مانده مسأله

از جمله کاربردهای مهم فن‌آوری پینچ، طراحی اصلاحی شبکه مبدل‌های حرارتی واحدی است که ظرفیت تولیدی آن بنا به دلایل مختلف افزایش یافته است. زمانی که دبی جریان‌های فرآیند افزایش می‌یابد، به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی آنها، دو نوع گلوگاه حرارتی و دینامیکی پدیدار می‌گردد؛ چرا که شبکه مبدل‌های حرارتی موجود دیگر چه از نظر حرارتی و چه از نظر دینامیکی پاسخ‌گوی شرایط جدید نخواهد بود [۲ و ۳]. گلوگاه حرارتی از آنجا ناشی می‌شود که به دلیل افزایش ظرفیت نیاز به یوتیلیتی‌های جدید می‌باشد ولی چون معمولاً دارای هزینه بالایی هستند، نیاز است تا بار حرارتی آنها در مقدار اولیه پیش از افزایش ظرفیت ثابت بماند و در عوض از مبدل‌های جدید در شبکه استفاده گردد. گلوگاه دینامیکی پس از افزایش ظرفیت نیز ناشی از عدم توانایی پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود در انتقال مناسب سیالات می‌باشد که برای جبران این مشکل و تأمین افت فشار لازم باید از مبدل‌های جدید در شبکه استفاده شود. موضوع اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی در یک واحد افزایش ظرفیت یافته به منظور بر طرف نمودن گلوگاه‌های پیش آمده نخستین بار توسط پلی و احمد (۱۹۸۹) مورد توجه قرار گرفت؛ ولی با وجود اینکه سعی شده بود تا اثرات افت فشار و محدودیت‌های دینامیکی فرآیند تا حدی در مرحله هدف‌گذاری در نظر قرار گرفته شود، روش آنها براساس ضرایب انتقال حرارت ثابت جریان‌ها عمل می‌کرد. به منظور بر طرف نمودن مشکلات این روش، پنجه‌شاهی و غفوریان (۱۹۹۴) روشی را براساس افت فشار مجاز جریان‌ها ارائه دادند [۲]. در سال‌های بعد نیز استفاده از افت فشار بهینه جریان‌ها توسط پنجه‌شاهی و طاهونی (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مطلوبی نیز حاصل گردید. [۳] موضوع اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی واحدی که براساس اصول پینچ طراحی شده ولی دبی جریان‌های آن افزایش یافته است، مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. [۱]

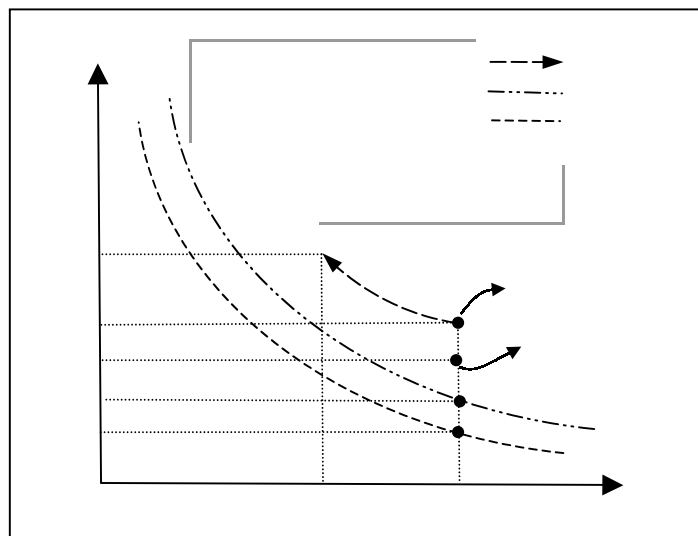
۱- هدف‌گذاری براساس افت فشار بهینه جریان‌ها جهت رفع گلوگاه‌های حاصل از افزایش ظرفیت

در شکل شماره (۱) مراحل مختلف هدف‌گذاری جهت رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش ظرفیت براساس افت فشار مجاز جریان‌ها پرداخته شده‌است؛ بر این اساس، مرحله هدف‌گذاری به ترتیب ذیل صورت می‌گیرد:

- شبیه‌سازی عملکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت به منظور مشخص شدن بار حرارتی مبدل‌ها و سرویس‌های جانبی و نیز افت فشار جریان‌ها پس از افزایش ظرفیت؛
- رسم منحنی ایده‌آل انرژی - سطح براساس افت فشار مورد نیاز جریان‌ها به منظور تعیین راندمان شبکه پس از افزایش ظرفیت براساس نقطه جدید کارکرد شبکه (نقطه B) و حداقل سطح فرآیند - فرآیند شبکه متناظر با این نقطه (نقطه A). با توجه به اینکه پس از افزایش ظرفیت، بسیاری از پارامترهای جریان‌ها از جمله دبی و افت فشار آنها تغییر می‌کند و از طرف دیگر بار مصرفی کوره نیز افزایش یافته است، نمی‌توان انتظار داشت که راندمان شبکه پس از افزایش ظرفیت باید برابر بار راندمان قبل از افزایش ظرفیت باشد.
- رسم منحنی انرژی - سطح با در نظر گرفتن حداکثر افت فشار قابل تأمین توسط تجهیزات دینامیکی موجود به منظور تخمین سطح مورد نیاز جهت رفع گلوگاه دینامیکی شبکه. پس از رسم منحنی اخیر، با فرض ثابت ماندن راندمان شبکه پس از رفع گلوگاه دینامیکی و با توجه به راندمان محاسبه شده

براساس افت فشارهای مورد نیاز، یک سطح فرضی برای شبکه در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مسیر هدف‌گذاری را از آن نقطه رسم نمود (نقطه D).

- با توجه به میزان راندمان شبکه، مسیر هدف‌گذاری (α - ثابت یا α - افزایشی) از نقطه سطح فرضی جهت کاهش بار کوره تا مقدار اولیه پیش از افزایش ظرفیت رسم می‌شود. پس از رسم منحنی هدف‌گذاری، سطح معادل با بار پیش از افزایش ظرفیت کوره به عنوان سطح نهایی هدف‌گذاری شده شبکه انتخاب می‌گردد (A_T در شکل شماره (۱)).



شکل ۱- مراحل هدف‌گذاری به منظور رفع گلوگاه براساس افت فشار ثابت جریان‌ها

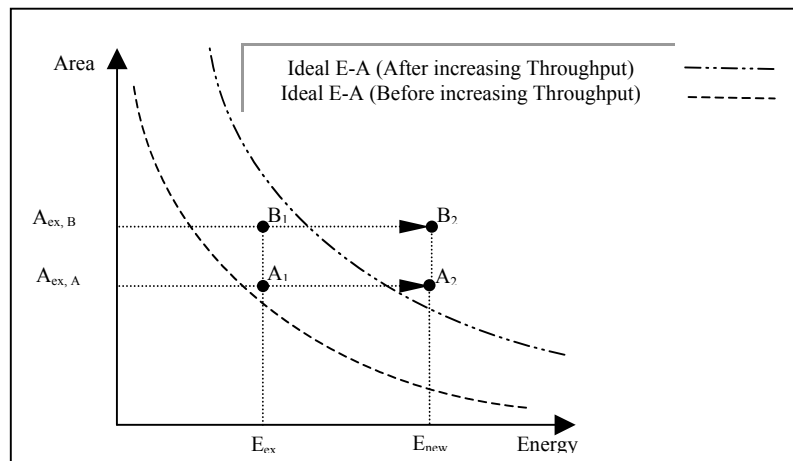
پنجه‌شاهی و طاهونی پیشنهاد نموده‌اند که بهتر است منحنی هدف‌گذاری براساس افت فشار بهینه جریان‌ها رسم گردد تا علاوه بر شرایط اقتصادی تجهیزات حرارتی، شرایط اقتصادی تجهیزات دینامیکی جهت رانش سیال نیز مد نظر قرار گیرد؛ به عبارت دیگر، می‌توان بررسی نمود که آیا می‌توان پمپ یا کمپرسور قوی‌تری جهت نصب مبدل‌های حرارتی با افت فشار مجاز بالا به کار برد تا هزینه کلی واحد بهبود یابد و یا این که اگر تجهیزات دینامیکی ضعیف‌تری انتخاب شوند و در عوض سطح مبدل حرارتی افزایش یابد، آیا کاهش مصرف برق تجهیزات دینامیکی می‌تواند بر هزینه نصب مبدل‌ها برتری داشته باشد یا خیر.

شرایط پس از افزایش ظرفیت در شبکه‌های از پیش طراحی شده به روش PDM

شبکه‌ای که از پایه براساس قوانین پیچ طراحی شده باشد، مسلماً دارای مبدل‌هایی است که از راندمان نسبی خوبی برخوردار بوده و نسبت به شبکه‌های دیگر، از نظر استفاده مناسب از سطح در شرایط مطلوب‌تری می‌باشد. در شکل شماره (۲)، نقطه کارکرد شبکه‌ای که به روش PDM طراحی شده است (نقطه A_1) با نقطه کارکرد شبکه‌ای که به روشی دیگری طراحی شده (نقطه B_1)، با فرض یکتا بودن

منحنی ایده‌آل انرژی - سطح در هر دو شبکه، مقایسه شده است. بالاتر بودن نقطه B_1 نسبت به نقطه A_1 به دلیل دورتر بودن مبدل‌های چنین شبکه‌ای نسبت به وضعیت ایده‌آل انتقال حرارت عمودی در داخل مبدل‌های شبکه می‌باشد. پس از این که ظرفیت هر دو شبکه به یک اندازه افزایش می‌یابد، نقطه کارکرد آنها روی منحنی ایده‌آل انرژی - سطح تغییر خواهد کرد. مسائل اصلاحی رفع گلوگاه که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند، مشابه شبکه دوم بوده‌اند که نقطه کارکرد آنها پس از افزایش ظرفیت از نقطه B_1 به موقعیتی مانند نقطه B_2 می‌رسد.

اما به واسطه اینکه نقطه کارکرد پیش از افزایش ظرفیت شبکه‌ای که قبلاً به روش PDM طراحی شده است خیلی به منحنی انرژی - سطح پیش از افزایش ظرفیت نزدیک است، فعلاً نمی‌توانیم با قاطعیت قبول کنیم که حتماً پس از افزایش ظرفیت به نقطه‌ای با موقعیت نقطه A_2 در شکل شماره (۲) منتقل خواهد شد که بالای منحنی انرژی - سطح پس از افزایش سطح می‌باشد. به عنوان مثال، به نظر می‌رسد در مواردی که میزان افزایش ظرفیت بالا می‌باشد نقطه A_2 زیر منحنی قرار بگیرد؛ چرا که هرچه ظرفیت بیشتر افزایش یابد، حداقل سطح مورد نیاز برای بازیافت حرارتی افزایش بیشتری خواهد یافت و منحنی ایده‌آل انرژی - سطح پس از افزایش ظرفیت در موقعیت بالاتری نسبت به حالت پیش از افزایش ظرفیت قرار خواهد گرفت در حالی که سطح موجود شبکه ثابت می‌باشد. بنابراین ضروری است که این وضعیت بررسی گردد و در مورد راهکارهای آن اندیشیده شود.



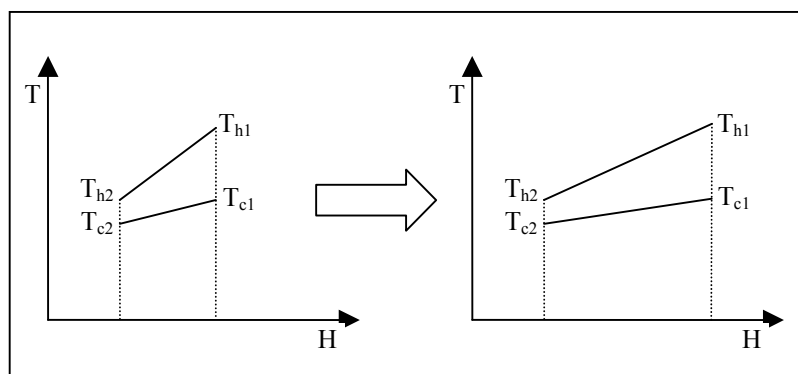
شکل ۲- مقایسه شرایط عملکرد شبکه طراحی شده به روش PDM با شبکه‌ای دیگر

از آن جایی که در طراحی از پایه شبکه، براساس ابزارهای منحنی نیروی رانش (DFP) و تحلیل باقی‌مانده مسأله (RPA) مبدل‌های موجود شبکه در مکان فعلی قرار گرفته‌اند، باید بررسی نمود که پس از افزایش ظرفیت چه اتفاقی در شبکه می‌افتد و نیز چگونه شرایط مبدل‌ها در شبکه تغییر می‌کند.

۱-۲- بررسی وضعیت جریان‌ها پس از افزایش ظرفیت

در شکل شماره (۳)، یک فاصله آنتالپی از یک منحنی مرکب فرضی به همراه دماهای آن نشان داده شده است. با فرض این که افزایش دبی خوراک ورودی فرآیند موجب همین مقدار افزایش در دبی جریان‌های

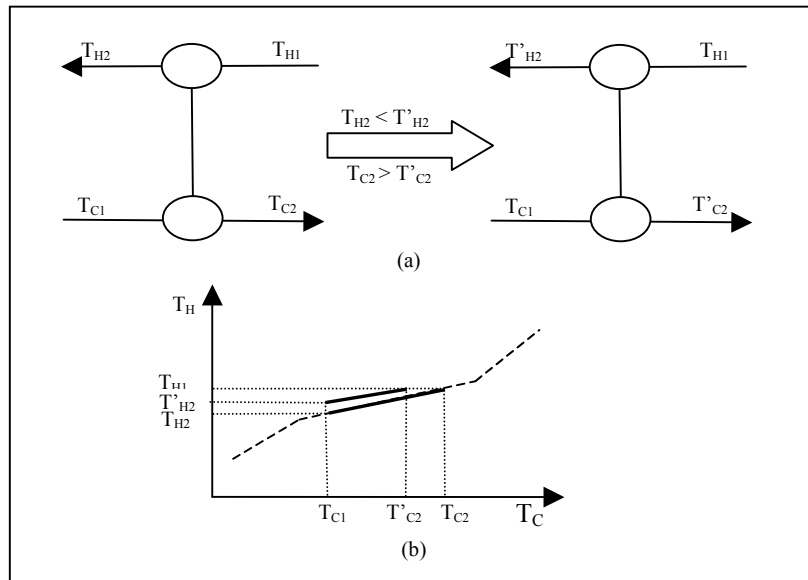
دیگر می‌گردد، افزایش ظرفیت باعث می‌شود تا شیب هر دو منحنی مرکب گرم و سرد به یک اندازه تغییر کند؛ به عبارت دیگر، هرچند تصویر منحنی‌های مرکب روی محور آنتالپی پس از افزایش ظرفیت زیادت‌تر می‌شود، ولی در هر دو طرف فاصله آنتالپی، دو دمای گرم و سرد متقابل نسبت به یکدیگر تغییری نخواهند داشت زیرا شکستگی‌های منحنی‌های مرکب تابع دماهای ابتدا و انتهای جریان‌های شبکه هستند که با وجود افزایش ظرفیت تغییری نمی‌کنند. بنابراین می‌توان بیان کرد که منحنی نیروی رانش (DFP) نیز در یک شبکه که براساس شکستگی‌های منحنی‌های مرکب حاصل می‌شود، در هر دو حالت پیش و پس از افزایش ظرفیت یکسان خواهد بود. البته این ادعا با این فرض صحیح است که پس از افزایش ظرفیت تعداد جریان‌ها تغییری نکرده باشد.



شکل ۳- وضعیت یک فاصله آنتالپی از منحنی مرکب پیش و پس از افزایش ظرفیت

۲-۲- بررسی وضعیت مبدل‌های موجود شبکه پس از افزایش ظرفیت

در شکل شماره (a.۴)، یک مبدل حرارتی روی گرید در حالت پیش از افزایش ظرفیت نشان داده شده است که جریان گرم از دمای T_{H1} به دمای T_{H2} کاهش یافته و جریان سرد نیز از دمای T_{C1} تا دمای T_{C2} افزایش می‌یابد. زمانی که در اثر افزایش ظرفیت، دبی جریان‌ها افزایش یابد، دیگر مبدل مورد نظر بدلیل هندسه ثابت نمی‌تواند از نظر حرارتی کارآیی گذشته خود را داشته باشد و بنابراین دمای خروجی جریان گرم تا T_{H2} کاهش می‌یابد و به طور مشابه دمای خروجی جریان سرد نیز تا T_{C2} کاهش خواهد یافت. حال اگر خط عملکرد مبدل را در دو حالت پیش و پس از افزایش ظرفیت روی منحنی رانش نشان دهیم، وضعیتی مشابه شکل (b.۴) ملاحظه خواهد شد؛ براساس این شکل می‌توان گفت که هرچند یک مبدل قبل از افزایش ظرفیت در شرایط خوبی از نظر انتقال حرارت عمودی در شبکه برخوردار بوده‌است، ولی در هر حال پس از افزایش ظرفیت، از شرایط مطلوب انتقال حرارت عمودی در شبکه دور گشته‌است. این اتفاق در مورد تمامی مبدل‌های موجود شبکه خواهد افتاد و بنابراین اگر با ابزار RPA تحلیل شوند، متوجه خواهیم شد که با شبکه‌ای مواجه هستیم که دیگر براساس طراحی قبلی توسط پینچ کار نمی‌کند.

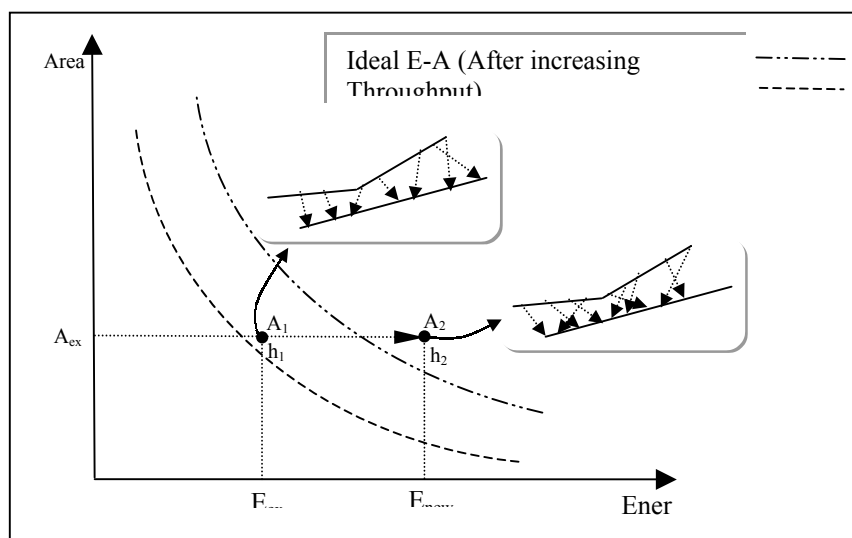


شکل ۴- وضعیت حرارتی میبدل در شبکه پیش و پس از افزایش ظرفیت

۳-۲- تعیین نقطه کارکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت

اکنون با توجه به مطالبی که پیرامون وضعیت جریان‌ها و نیز میبدل‌ها پس از افزایش ظرفیت در شبکه عنوان شد بهتر می‌توان در مورد نقطه عملکرد جدید شبکه بحث نمود. همان‌طور که در شکل شماره (۵) دیده می‌شود، نقطه کارکرد شبکه در حالت پیش از افزایش ظرفیت به فاصله h_1 از منحنی ایده‌آل انرژی - سطح مربوطه قرار گرفته و در حالت پس از افزایش ظرفیت نیز به فاصله h_2 از منحنی ایده‌آل انرژی - سطح پس از افزایش ظرفیت قرار گرفته است. برای روشن‌تر شدن موضوع و براساس مطالب بیان‌شده قبلی می‌توان این‌گونه تصور نمود که نقاط A_1 و A_2 مربوط به دو شبکه مختلف هستند که موقعیت آنها نسبت به منحنی انرژی - سطح مربوطه‌شان نشان داده شده‌است. اما براساس آنچه که در قسمت (۲-۲) نتیجه‌گیری شد، از آنجایی که نقطه A_2 مربوط به شبکه‌ای می‌باشد که از نظر انتقال حرارت عمودی نسبت به شبکه دیگر در وضعیت نامطلوب‌تری قرار دارد، لذا باید از راندمان کمتری نیز برخوردار باشد؛ به عبارت دیگر، شبکه‌ای که قبلاً براساس پینچ طراحی شده است پس از افزایش ظرفیت، نه تنها نقطه کارکرد آن حتماً بالای منحنی ایده‌آل انرژی - سطح پس از افزایش ظرفیت قرار می‌گیرد، بلکه فاصله آن تا منحنی نسبت به حالت پیش از افزایش ظرفیت نیز بیشتر خواهد بود ($h_1 < h_2$).

حال براساس نتایج فوق می‌توان گفت که جهت انجام هدف‌گذاری به منظور رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه‌هایی که از پیش براساس روش پینچ طراحی شده‌اند، می‌توان از همان روش‌های معمول که برای هدف‌گذاری دیگر شبکه‌ها تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند استفاده نمود.



شکل ۵- محل کارکرد شبکه طراحی شده به روش PDM پس از افزایش ظرفیت

۳- مسأله موردی

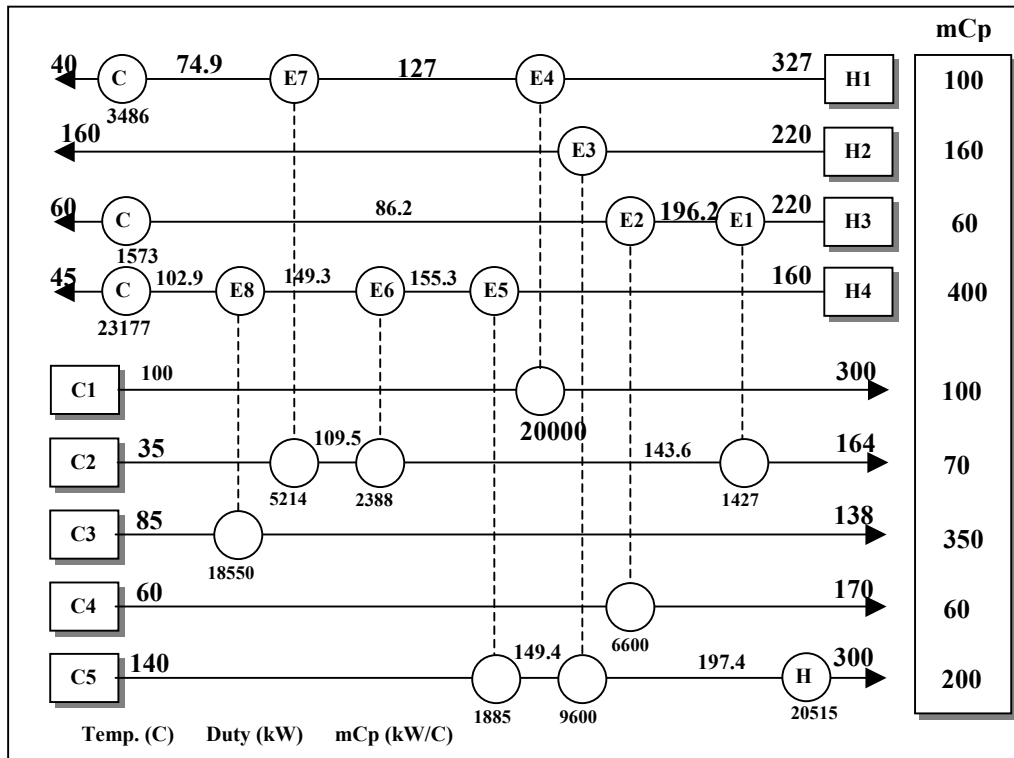
به منظور بررسی عملی آنچه که در فسمت قبلی بیان گردید و مشاهده نتایج واقعی، یک مسأله نمونه مورد تحقیق قرار گرفت. این مسأله نمونه، مربوط به یک مجتمع آروماتیک می باشد که طراحی از پایه^۱ شبکه مبدل های حرارتی آن توسط پنجه شاهی (۱۹۹۲) براساس افت فشار مجاز جریان ها انجام شده است [۵] و در این تحقیق، با فرض این که قرار است تا دبی تمام جریان های شبکه ۲۰٪ افزایش یابد، ضمن بررسی شرایط شبکه پس از افزایش ظرفیت، مراحل هدف گذاری و طراحی آن پس از افزایش ظرفیت جهت رفع گلوگاه های حاصل انجام و مورد بررسی قرار گرفت.

شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک توسط گرید طراحی در شکل شماره (۶) نشان داده شده است؛ جریان های گرم از H1 تا H4 مشخص شده و همگی از سمت پوسته مبدل ها عبور می کنند و جریان های سرد نیز از C1 تا C5 هستند که از سمت لوله مبدل ها عبور می کنند. همان طور که در این شکل دیده می شود، مصرف انرژی اولیه شبکه در سرویس جانبی گرمکن^۲ معادل ۲۰۵۱۵ kW می باشد.

۲۰

نشریه انرژی ایران / سال نهم / شماره ۳۰ / آبان ۱۳۸۳

1- Grass Root Design
2- Heater

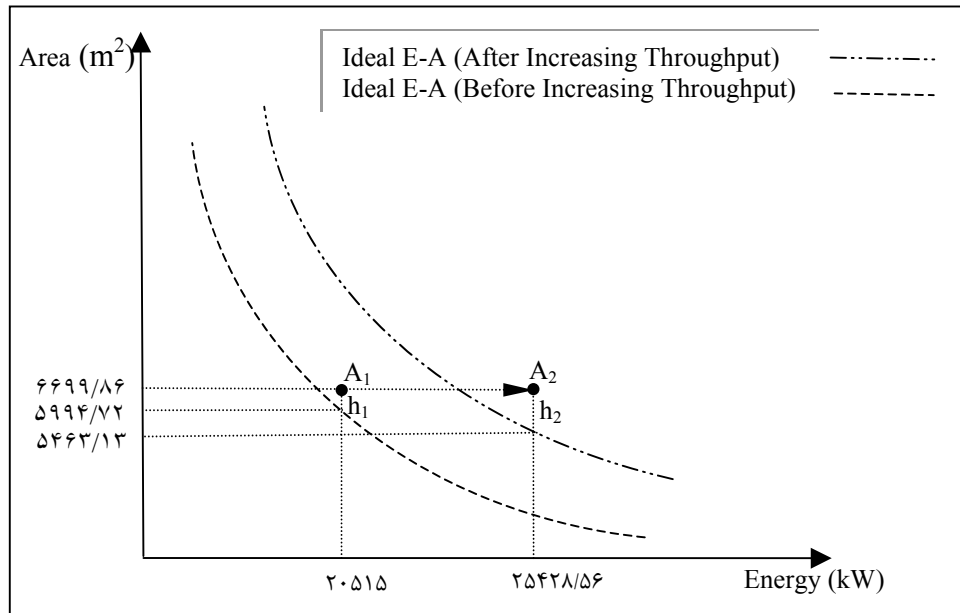


شکل ۶- شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک

۱-۳- نقطه عملکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت

همان طور که در شکل شماره (۷) دیده می شود، پیش از افزایش ظرفیت شبکه در نقطه A_1 قرار دارد که در این نقطه سطح مبدل های حرارتی موجود برابر $6699/86 \text{ m}^2$ و حداقل سطح فرآیند - فرآیند شبکه $5994/72 \text{ m}^2$ می باشد؛ همان طور که در قسمت (۲) پیش بینی شده بود، به دلیل آن که طراحی از پایه شبکه به روش PDM انجام شده بود پیش از افزایش ظرفیت اختلاف ناچیزی مابین سطح مبدل های حرارتی موجود با حداقل سطح فرآیند - فرآیند وجود دارد.

پس از افزایش دبی جریان ها مجموع بار حرارتی مورد نیاز در گرمکن ها تا $25428/56 \text{ kW}$ افزایش یافته و محل عملکرد شبکه نیز به نقطه A_2 انتقال یافته است که در این نقطه حداقل سطح فرآیند - فرآیند شبکه معادل $5463/13 \text{ m}^2$ برآورد شده است. براساس این نتایج، همان طور که قبلاً از نظر تئوری اثبات شد، اکنون نیز به طور عملی ملاحظه می شود که نه تنها نقطه عملکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت حتماً بالای منحنی ایده آل انرژی - سطح قرار گرفته، بلکه فاصله اش نیز تا منحنی نسبت به حالت پیش از افزایش ظرفیت بیشتر می باشد.



شکل ۷- مکان شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک پیش و پس از افزایش ظرفیت

۲-۳- هدف گذاری سطوح اضافی جهت رفع گلوگاه های دینامیکی و حرارتی

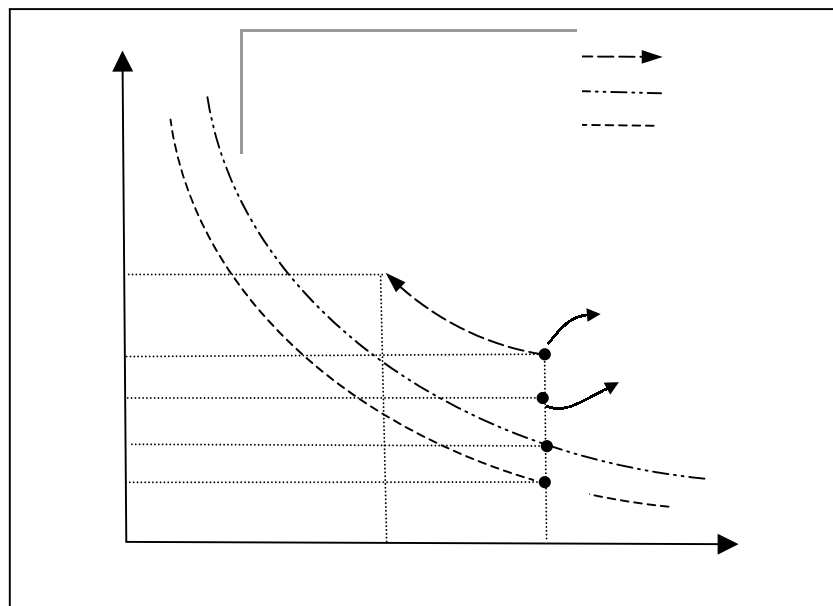
در جدول شماره (۱)، اطلاعات عمومی و اقتصادی فرآیند از جمله هزینه مبدل های حرارتی، هزینه تجهیزات دینامیکی، هزینه سرویس های جانبی سرد و گرم و نرخ بهره که نتایج مرحله هدف گذاری به شدت وابسته به این اطلاعات می باشند آورده شده است.

جدول ۱- اطلاعات عمومی و اقتصادی فرآیند

Hot Utility Cost (£/KW.yr): ۷۰	Plant Life Time (yr): ۲۰
Cold Utility Cost (£/KW.yr): ۷	Interest Rate (%): ۱۵
Power Cost (£/KW.yr): ۶۰	Max Area per Shell: ۵۸۰
	Number of Tube Passes: ۲
	X-Factor for Multiple Pass Shell: /۸
Exchanger Capital Cost: $۸۶۰۰ + ۶۷۰ \cdot (\text{Area})^{0.75}$	
Pump Capital Cost: $۸۶۰۰ + ۷۳۱۰ \cdot (Q \cdot \sqrt{H})$	
Pump Efficiency (%): ۷۰	
Compressor Capital Cost: $۸۶۰۰ + ۸۳/۶۶ \cdot (W)^{0.75}$	
Compressor Efficiency (%): ۷۰	
Annualization Factor: $i \cdot (i+1)^N / \{(i+1)^N - 1\}$	

در شکل شماره (۸)، نتایج مراحل مختلف هدف گذاری به منظور رفع گلوگاه های حاصل از افزایش ظرفیت واحد آروماتیک و در نهایت رساندن بار حرارتی کوره به مقدار اولیه پیش از افزایش ظرفیت نشان

داده شده است. در ابتدای هدف گذاری، راندمان حرارتی شبکه پس از افزایش ظرفیت برابر $0/815$ محاسبه شد. سپس با فرض اینکه تجهیزات دینامیکی واحد پس از افزایش ظرفیت تنها قادر به تأمین 80% افت فشار اولیه جریانها پیش از افزایش ظرفیت هستند، میزان سطوح اضافی مورد نیاز برای جبران این کمبود و به عبارتی سطح فرضی شبکه معادل $7625/63 \text{ m}^2$ برآورد گردید. در نهایت، با انتخاب مسیر هدف گذاری α - افزایشی سطح نهایی شبکه برای رساندن بار حرارتی کوره تا مقدار اولیه 20515 kW براساس روش افت فشار بهینه جریانها تخمین زده شد. در جدول شماره (۲)، نتایج مرحله هدف گذاری نشان داده شده است؛ مطابق اطلاعات این جدول، ΔT_{\min} شبکه برابر $9/52 \text{ }^\circ\text{C}$ می باشد؛ در این نقطه دماهای گرم و سرد نقطه پینچ به ترتیب $160 \text{ }^\circ\text{C}$ و $150/47 \text{ }^\circ\text{C}$ می باشد.



شکل ۸- مراحل هدف گذاری اصلاح شبکه مبدل های واحد آروماتیک

جدول ۲- نتایج هدف گذاری سطح براساس مسیر α - افزایشی

$\Delta T_{\min} (^\circ\text{C})$	۹/۵۲	Minimum 1-2 Area (m^2)	۱۱۸۶۹/۰۲
Cold Utility (kW)	۲۹۵۷۴/۳۰	Target Area (m^2)	۱۴۱۴۹/۸۸
Hot Utility (kW)	۲۰۵۱۵/۲۲	Existing Area (m^2)	۷۶۲۵/۶۳
Exist Hot Ut. (kW)	۲۵۴۲۸/۵۲	Additional Area (m^2)	۶۵۲۳/۵۲
Hot Ut. Reduc. (kW)	۴۹۱۲/۳۰	α - Incremental	۰/۸۳۹

فهرست علائم و اختصارات:

- α : راندمان سطح شبکه مبدل حرارتی
 $\alpha_{\Delta P}$: راندمان سطح شبکه براساس افت فشار ثابت
 α_h : راندمان سطح شبکه براساس ضرایب انتقال حرارت ثابت
 ΔT_{LM} : متوسط لگاریتمی اختلاف دما
 ΔT_{min} : حداقل اختلاف دمای شبکه در منحنی‌های مرکب
 ΔP : افت فشار
 ΔA : سطح اضافه شده به شبکه
 A_{Ex} : سطح مبدل حرارتی
 A_{ex} : سطح موجود شبکه
 A_{min} : حداقل سطح فرآیند - فرآیند شبکه
 A_{1-2} : سطح واقعی مبدل حرارتی
 ΔE : کاهش مصرف انرژی شبکه
 E : مصرف انرژی
 H : آنتالپی
 h : ضریب انتقال حرارت فیلمی
 R_f : مقاومت رسوب‌دهی
 U : ضریب کلی انتقال حرارت
 I : هزینه سرمایه‌گذاری
 S : هزینه صرفه‌جویی

منابع

- ۱- لطیفی، محمد؛ «رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه مبدل‌های حرارتی طراحی شده به روش پینچ»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۸۲.
- ۲- غفوریان صدیق، مهران؛ «اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی به منظور رفع گلوگاه با در نظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۳.
- ۳- طاهونی، نسیم؛ «رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه مبدل‌های حرارتی همراه با بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۹.
- ۴- فلاحي، حمیدرضا؛ «بهینه‌سازی افت فشار در انتگراسیون فرایند»، رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۸.

- 5- Panjeh Shahi, M.H.; "Pressure Drop Consideration in Process Integration", Ph.D. Thesis, UMIST, 1992.
- 6- Polly G.T., Panjeh Shahi M.H. and Jegede F.O.; "Pressure Drop Consideration in the Retrofit of H.E.N.s", Trans. IChemE, Vol.68, Part A, May 1990.

- 7- Polly G.T., Panjeh Shahi M.H.; “Interfacing Heat Exchanger Network Synthesis and Detailed Heat Exchanger Design”. Trans. IChemE, Vol. 69, Part A, PP. 445-457, November 1991.
- 8- Polly G.T., Panjeh Shahi M.H. and Nunenz M.P.; “Rapid Design Algorithm for Shell and Tube and Compact Heat Exchangers”, Trans. IChemE, Vol. 69, Part A, PP. 435-444, November 1991.
- 9- www.PinchTechnology.com
- 10- www.linnhoffmarch.co.uk