

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

محمدحسن پنجه شاهی، نسیم طاهونی، محمد لطیفی

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

از فن آوری پینچ در طراحی اصلاحی شبکه مبدل های حرارتی به دو منظور استفاده می شود که عبارتند از: اصلاح شبکه به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی و نیز اصلاح شبکه به منظور رفع گلوگاه های حاصل از افزایش ظرفیت. تمامی شبکه هایی که تاکنون مطالعات اصلاحی آنها انجام شده است، شبکه هایی بوده اند که قبلاً براساس روش های دیگری بغیر از روش های فن آوری پینچ طراحی شده اند. در این مقاله، اصلاح شبکه های مبدل حرارتی که از پیش براساس فن آوری پینچ طراحی شده اند ولی به دلیل افزایش ظرفیت نیاز به اصلاح دارند مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور، ابتدا با بررسی وضعیت چنین شبکه هایی پس از افزایش ظرفیت و اینکه چه تغییراتی در آنها ایجاد می شود، روش مناسب هدف گذاری جهت رفع گلوگاه های حاصل از افزایش ظرفیت در آنها تعیین گردیده و سپس جهت بررسی صحت مطالب بیان شده، نتایج هدف گذاری و طراحی اصلاحی یک مسأله موردی براساس افت فشار بهینه جریان ها ارائه خواهد شد.

واژه های کلیدی: فن آوری پینچ، شبکه مبدل های حرارتی، منحنی مرکب، هدف گذاری، منحنی انرژی، سطح، گلوگاه های دینامیکی و حرارتی، منحنی نیروی رانش، تحلیل باقی مانده مسأله

از جمله کاربردهای مهم فن آوری پنبه، طراحی اصلاحی شبکه مبدل های حرارتی واحدی است که ظرفیت تولیدی آن بنا به دلایل مختلف افزایش یافته است. زمانی که دبی جریان های فرآیند افزایش می یابد، به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی آنها، دو نوع گلوگاه حرارتی و دینامیکی پدیدار می گردد؛ چرا که شبکه مبدل های حرارتی موجود دیگر چه از نظر حرارتی و چه از نظر دینامیکی پاسخ گوی شرایط جدید نخواهد بود [۲ و ۳]. گلوگاه حرارتی از آنجا ناشی می شود که به دلیل افزایش ظرفیت نیاز به یوتیلیتی های جدید می باشد 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 مبدل های جدید در شبکه استفاده گردد. گلوگاه دینامیکی پس از افزایش ظرفیت نیز ناشی از عدم توانایی پمپ ها و کمپرسورهای موجود در انتقال مناسب سیالات می باشد که برای جبران این مشکل و تأمین افت فشار لازم باید از مبدل های جدید در شبکه استفاده شود. موضوع اصلاح شبکه مبدل های حرارتی در یک واحد افزایش ظرفیت یافته به منظور بر طرف نمودن گلوگاه های 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 محدودیت های دینامیکی فرآیند تا حدی در مرحله هدف گذاری در نظر قرار گرفته شود، روش آنها براساس ضرایب انتقال حرارت ثابت جریان ها عمل می کرد. به منظور بر طرف نمودن مشکلات این روش، پنجه شاهی و غفوریان (۱۹۹۴) روشی را براساس افت فشار مجاز جریان ها ارائه دادند [۲]. در سال های بعد نیز استفاده از افت فشار بهینه جریان ها توسط پنجه شاهی و طاهونی (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مطلوبی نیز حاصل گردید. [۳] موضوع اصلاح شبکه مبدل های حرارتی واحدی که براساس اصول پنبه طراحی شده ولی دبی جریان های آن افزایش یافته است، مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. [۱]

۱- هدف گذاری براساس افت فشار بهینه جریان ها جهت رفع گلوگاه های حاصل از افزایش ظرفیت

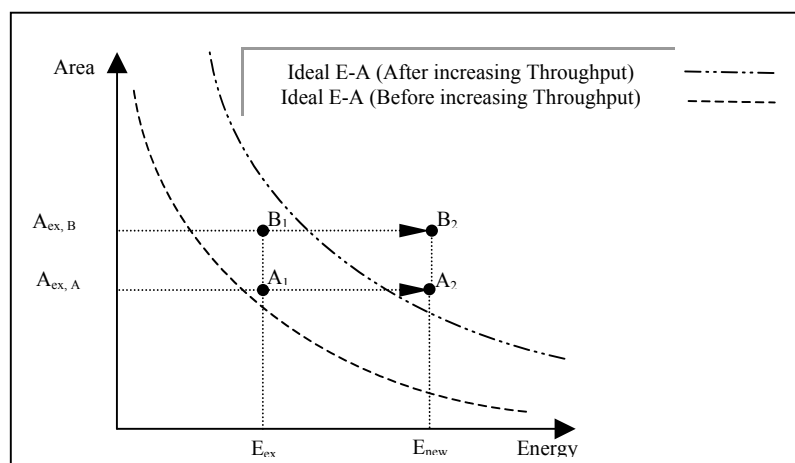
در شکل شماره (۱) مراحل مختلف هدف گذاری جهت رفع گلوگاه های ناشی از افزایش ظرفیت براساس افت فشار مجاز جریان ها پرداخته شده است؛ بر این اساس، مرحله هدف گذاری به ترتیب ذیل صورت می گیرد:

- شبیه سازی عملکرد شبکه پس از افزایش ظرفیت به منظور مشخص شدن بار حرارتی مبدل ها و سرویس های جانبی و نیز افت فشار جریان ها پس از افزایش ظرفیت؛
- رسم منحنی ایده آل انرژی - سطح براساس افت فشار مورد نیاز جریان ها 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 جریان ها از جمله دبی و افت فشار آنها تغییر می کند و از طرف دیگر بار مصرفی کوره نیز افزایش یافته است، نمی توان 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

Downloaded from necjournals.ir on 2023-10-06]

منحنی ایده آل انرژی - سطح در هر دو شبکه، مقایسه شده است. بالاتر بودن نقطه B_1 نسبت به نقطه A_1 به دلیل دورتر بودن مبدل های چنین شبکه ای نسبت به وضعیت ایده آل انتقال حرارت عمودی در داخل مبدل های شبکه می باشد. پس از این که ظرفیت هر دو شبکه به یک اندازه افزایش می یابد، نقطه کارکرد آنها روی منحنی ایده آل انرژی - سطح تغییر خواهد کرد. مسائل اصلاحی رفع گلوگاه که تاکنون مورد بررسی قرار گرفته اند، مشابه شبکه دوم بوده اند که نقطه کارکرد آنها پس از افزایش ظرفیت از نقطه B_1 به موقعیتی مانند نقطه B_2 می رسد.

اما به واسطه اینکه نقطه کارکرد پیش از افزایش ظرفیت شبکه ای که قبلاً به روش PDM طراحی شده است خیلی به منحنی انرژی - سطح پیش از افزایش ظرفیت نزدیک است، فعلاً نمی توانیم با قاطعیت قبول کنیم که حتماً پس از افزایش ظرفیت به نقطه ای با موقعیت نقطه A_2 در شکل شماره (۲) منتقل خواهد شد که بالای منحنی انرژی - سطح پس از افزایش سطح می باشد. به عنوان مثال، به نظر می رسد در مواردی که میزان افزایش ظرفیت بالا می باشد 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 ایده آل 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 می باشد. بنابراین ضروری است که این وضعیت بررسی گردد و در مورد راهکارهای آن اندیشیده شود.



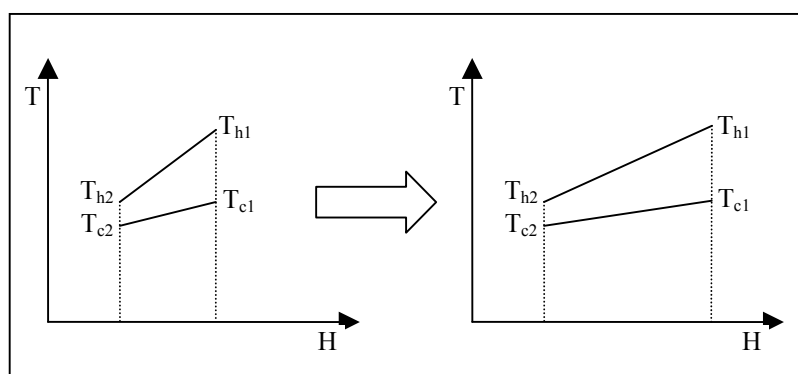
شکل ۲- مقایسه شرایط عملکرد شبکه طراحی شده به روش PDM با شبکه ای دیگر

از آن جایی که در طراحی از پایه شبکه، براساس ابزارهای منحنی نیروی رانش (DFP) و تحلیل باقی مانده مسأله (RPA) مبدل های موجود شبکه در مکان فعلی قرار گرفته اند، باید بررسی نمود که پس از افزایش ظرفیت چه اتفاقی در شبکه می افتد و نیز چگونه شرایط مبدل ها در شبکه تغییر می کند.

۲-۱- بررسی وضعیت جریان ها 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 جریان های

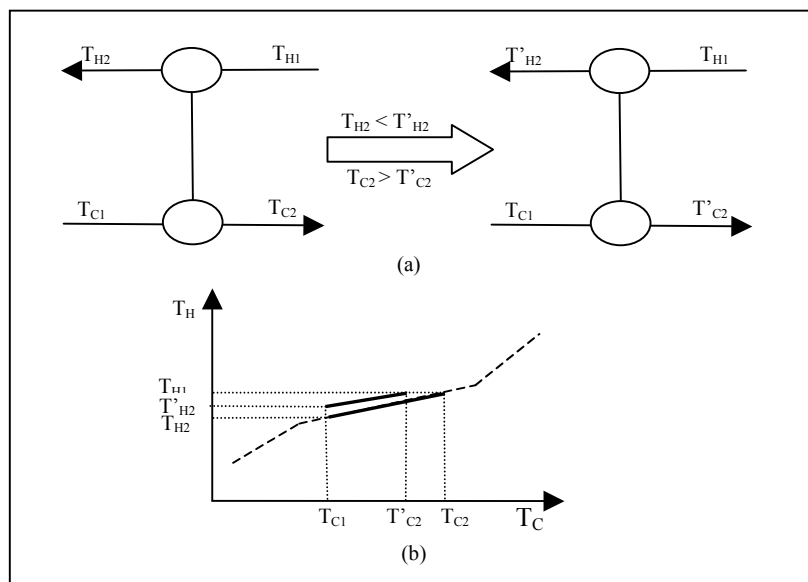
دیگر می‌گردد، افزایش ظرفیت باعث می‌شود تا شیب هر دو منحنی مرکب گرم و سرد به یک اندازه تغییر کند؛ به عبارت دیگر، هرچند تصویر منحنی‌های مرکب روی محور آنتالپی پس از افزایش ظرفیت زیاده‌تر می‌شود، ولی در هر دو طرف فاصله آنتالپی، دو دمای گرم و سرد متقابل نسبت به یکدیگر تغییری نخواهند داشت زیرا شکستگی‌های منحنی‌های 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.

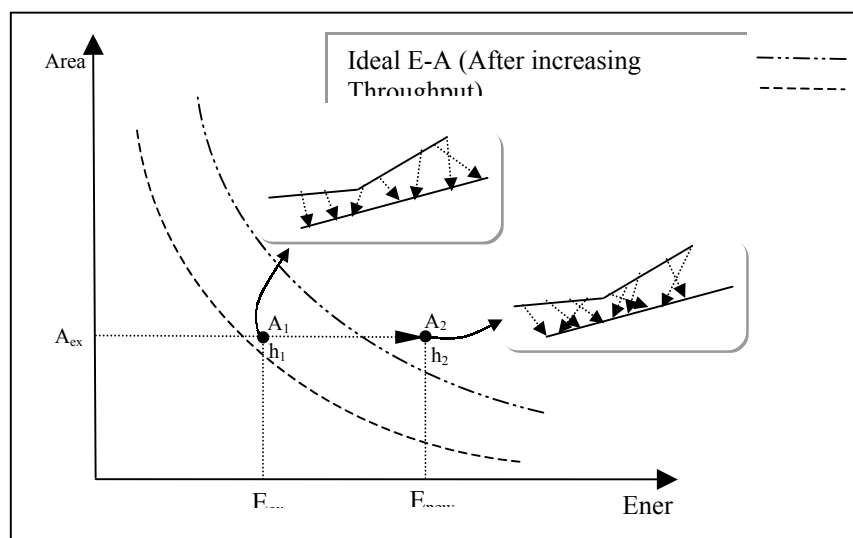


شکل ۴- وضعیت حرارتی مبدل در شبکه پیش و پس از افزایش ظرفیت

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

اکنون با توجه به مطالبی که پیرامون وضعیت جریان‌ها و نیز مبدل‌ها 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.



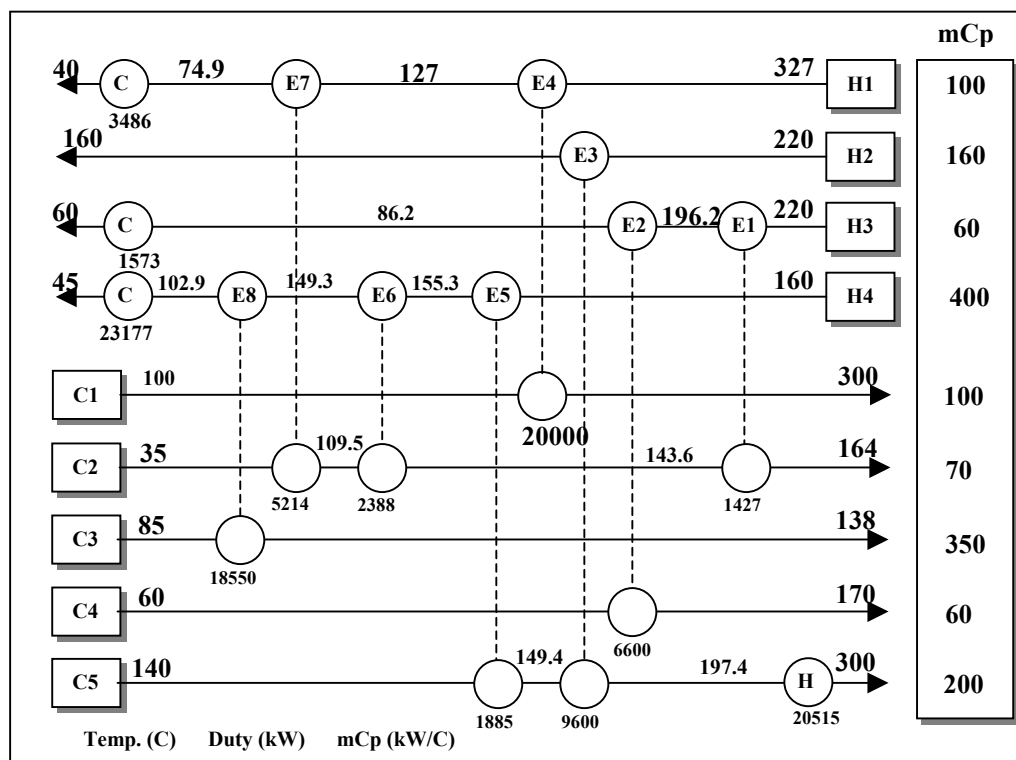
شکل ۵- محل کارکرد شبکه طراحی شده به روش PDM پس از افزایش ظرفیت

۳-مسأله موردی

به منظور بررسی عملی آنچه که در قسمت 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.

1- Grass Root Design
2- Heater

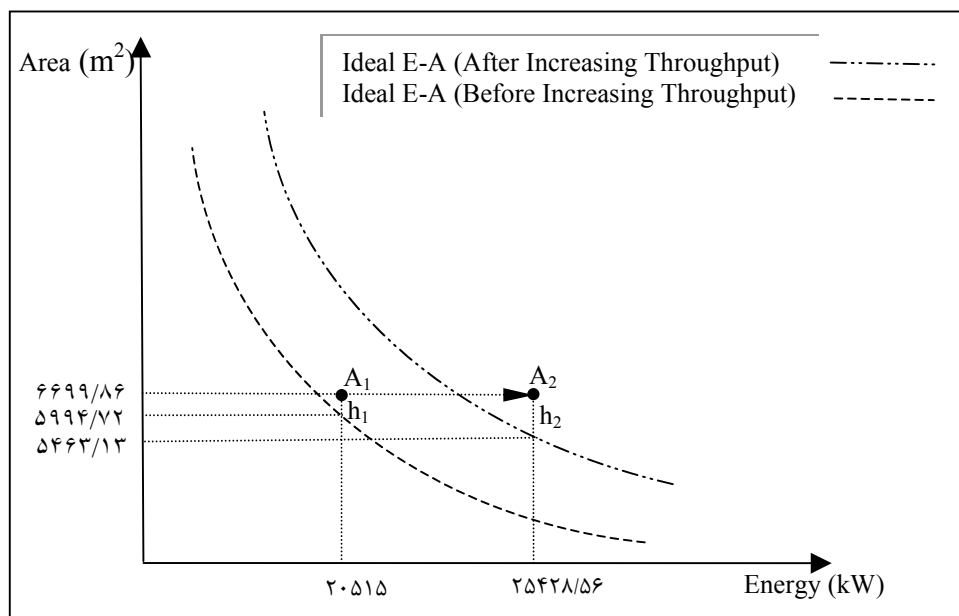


شکل ۶- شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک

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

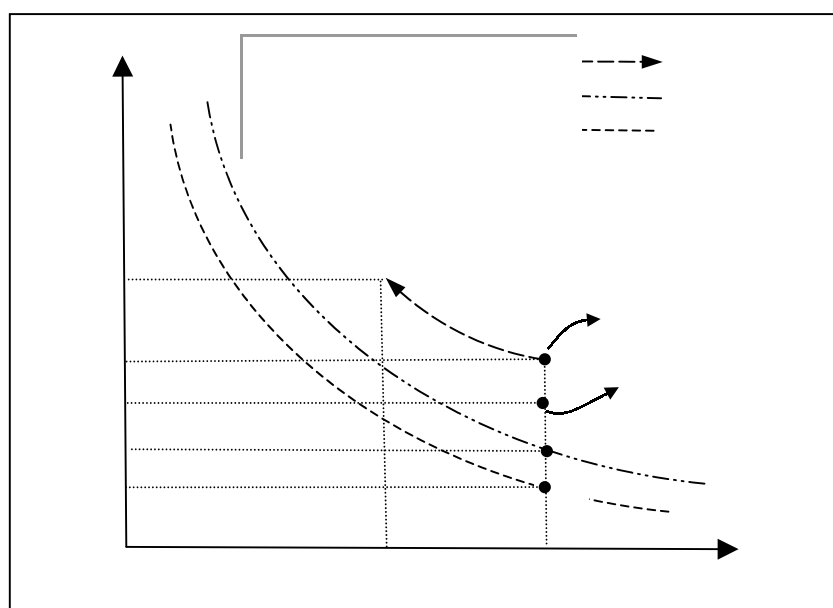
در جدول شماره (۱)، اطلاعات عمومی و اقتصادی فرآیند از جمله هزینه مبدل های حرارتی، هزینه تجهیزات دینامیکی، هزینه سرویس های جانبی سرد و گرم و نرخ بهره که نتایج مرحله هدف گذاری به شدت وابسته به این اطلاعات می باشند آورده شده است.

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: $۸۶۰۰ + ۶۷۰ \cdot (\text{Area})^{0.۸۸}$	
Pump Capital Cost: $۸۶۰۰ + ۷۳۱۰ \cdot (Q \cdot \sqrt{H})$	
Pump Efficiency (%): ۷۰	
Compressor Capital Cost: $۸۶۰۰ + ۸۳/۶۶ \cdot (W)^{0.۶۲}$	
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 ۰/۸۱۵ محاسبه شد. سپس با فرض اینکه تجهیزات دینامیکی واحد پس از افزایش ظرفیت تنها قادر به تأمین ۸۰٪ افت فشار اولیه جریان ها 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 20510 kW براساس روش افت فشار بهینه جریان ها تخمین زده شد. در جدول شماره (۲)، نتایج مرحله هدف گذاری نشان داده شده است؛ مطابق اطلاعات این جدول، $\Delta T_{\min}$ شبکه برابر $9/53^\circ\text{C}$ می باشد؛ در این نقطه دماهای گرم و سرد نقطه پینچ به ترتیب 160°C و $150/47^\circ\text{C}$ می باشد.



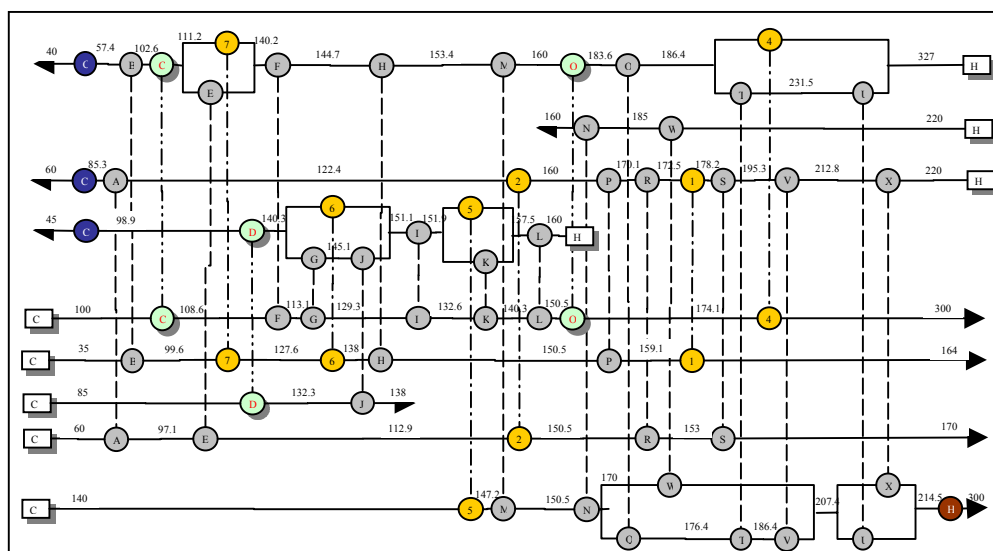
شکل ۸- مراحل هدف گذاری اصلاح شبکه مبدل های واحد آروماتیک

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

$\Delta T_{\min} (^\circ\text{C})$	۹/۵۳	Minimum 1-2 Area (m^2)	۱۱۸۶۹/۰۳
Cold Utility (kW)	۲۹۵۷۴/۳۰	Target Area (m^2)	۱۴۱۴۹/۸۸
Hot Utility (kW)	۲۰۵۱۵/۲۳	Existing Area (m^2)	۷۶۲۵/۶۳
Exist Hot Ut. (kW)	۲۵۴۲۸/۵۲	Additional Area (m^2)	۶۵۲۳/۵۳
Hot Ut. Reduc. (kW)	۴۹۱۳/۳۰	α - Incremental	۰/۸۳۹

نتیجه گیری

نتایج نهایی طراحی شبکه مبدل های واحد آروماتیک در جدول شماره (۳) آورده شده است؛ همان طور که در این جدول ملاحظه می گردد، بار مصرفی گرمکن که به دنبال افزایش ظرفیت به مقدار $25428/564 \text{ kW}$ رسیده بود، پس از مرحله طراحی به همان مقدار اولیه 20515 kW رسیده است. ضمن اینکه میزان سطح اضافی مورد نیاز برای غلبه بر محدودیت های دینامیکی و حرارتی نیز از مقدار پیش بینی شده در مرحله هدف گذاری به میزان $1/09\%$ کمتر به دست آمده است و این باعث شده تا راندمان کلی شبکه از مقدار پیش بینی شده $0/839$ تا مقدار $0/843$ بهبود یابد؛ با توجه به اینکه مقدار $\Delta T_{\min}$ هدف گذاری کوچک بود ($9/53^\circ\text{C}$) و به نظر می رسید در مرحله طراحی به واسطه نزدیک بودن منحنی های مرکب به یکدیگر و بنابراین نیاز به سطوح بیشتر تنگناهایی را ایجاد کند، نتایج جدول شماره (۳) قابل توجه می باشد. در شکل شماره (۹)، شبکه نهایی مبدل های حرارتی واحد آروماتیک که براساس حداقل اختلاف درجه حرارت $9/53^\circ\text{C}$ طراحی شده نشان داده شده است.



شکل ۹- شبکه نهایی واحد آروماتیک

جدول ۳- نتایج نهایی طراحی شبکه

	Targeting	Design	Error (%)
Hot duty (kW)	۲۰۵۱۵	۲۰۵۱۵	۰/۰۰
Additional Area (m ²)	۷۴۴۹/۳۰	۷۳۶۷/۵۴	-۱/۰۹
Efficiency	۰/۸۳۹	۰/۸۴۳	۰/۰۴۷
Investment (£)	۲۲۳۴۸۲۴/۸۱	۲۳۳۸۳۱۸/۷۹	۴/۶۳

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 منحنی های 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 رسوب دهی
U :	ضریب کلی انتقال حرارت
I :	هزینه سرمایه گذاری
S :	هزینه صرفه جویی

منابع

- ۱- لطیفی، محمد؛ «رفع گلوگاه های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه مبدل های حرارتی طراحی شده به روش پینچ»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۸۲.
- ۲- غفوریان صدیق، مهران؛ «اصلاح شبکه مبدل های حرارتی به منظور رفع گلوگاه با در نظر گرفتن محدودیت های افت فشار»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۳.
- ۳- طاهونی، نسیم؛ «رفع گلوگاه های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه مبدل های حرارتی همراه با بهینه سازی افت فشار جریان ها»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۹.
- ۴- فلاحی، حمیدرضا؛ «بهینه سازی 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