

بهینه سازی افت فشار در طراحی اصلاحی شبکه مبدلهای حرارتی

محمد حسن پنجه شاهی

استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی دانشگاه تهران

حمیدرضا فلاحی

کارشناس ارشد گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۲/۱۲، تاریخ تصویب ۷۸/۸/۸)

چکیده

یکی از جدیدترین روشهای معمول اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی که امروزه برای صرفه جویی در مصرف انرژی صنایع فرآیندی بکار می‌رود، روش افت فشار ثابت می‌باشد. این روش مبتنی بر توان پمپها و کمپرسورهای موجود شبکه بوده و تعویض آنها را با پمپها یا کمپرسورهای جدید مورد بررسی قرار نمی‌دهد. در این مقاله یک الگوریتم جدید برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی معرفی می‌شود و در نهایت اینچنین نتیجه‌گیری خواهد شد که برای به حداقل رساندن انرژی مصرفی شبکه، باید امکان تعویض پمپ‌ها و یا کمپرسورهای موجود را نیز بررسی کرد، و یا به عبارت دیگر، افت فشار به دلیل انتقال حرارت هر کدام از جریانهای شبکه را بهینه ساخت.

واژه‌های کلیدی: اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی، فن آوری پینچ، بهینه سازی افت فشار در شبکه مبدلهای حرارتی

مقدمه

در روش افت فشار ثابت، به هنگام اصلاح یک شبکه موجود، پمپها و همینطور کمپرسورهای موجود در شبکه همچنان باقی می‌مانند و شبکه با همان افت فشارهای مجاز شبکه قدیم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بنابراین طراحی‌هایی که تاکنون انجام شده است، توانایی در نظر گرفتن امکان تغییر افت فشارهای مجاز سیستم قدیم به جهت احتمال یک طراحی بهتر را نداشته است. به عبارت دیگر جابجائی پمپ و یا کمپرسور در طول طراحی و تاثیرات اقتصادی این عمل تاکنون تحت بررسی قرار نگرفته است.

در این مقاله، پس از معرفی توضیحات کلی درباره چگونگی هدف گذاری جهت اصلاح یک شبکه، روش جدید هدف گذاری معرفی خواهد شد.

فلسفه هدف گذاری

هدف گذاری [۲] عبارت است از مفهوم پیش بینی قبل از طراحی تفصیلی، بدین صورت که یک فرآیند چگونه بهترین نحوه عملکرد را برای رسیدن به نتایج طراحی شده دارا خواهد بود. در طراحی واحدهای جدید، مفهوم "هدف" همان هزینه کل سالیانه است که این هدف به وسیله مقدار انرژی مصرفی، سطح شبکه مبدل حرارتی، قیمت پمپ و کمپرسور و مقدار توان مصرفی پمپ و کمپرسور محاسبه می‌شود.

فن آوری پینچ یکی از بهترین راه‌های ممکن برای اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی در جهت صرفه جویی در مصرف انرژی می‌باشد [۷-۱]. تا قبل از اینکه بحث تئوری افت فشار مجاز جریانهای موجود در شبکه مبدلهای حرارتی یا به عرصه دنیای انتگراسیون فرآیند بگذارد [۷۱]، تمامی روشهای اصلاحی شبکه‌های موجود مبدلهای حرارتی با بهره‌گیری از اطلاعات فرآیندی و همچنین ضرائب انتقال حرارت مفروض، عمل می‌کردند [۶-۲]، بدون اینکه توجهی به افت فشار مبدلهای شبکه مورد مطالعه داشته باشند.

روش "افت فشار ثابت" [۷] با حل مشکلات حاد روش "ضرائب انتقال حرارت ثابت" [۶۲] و با ارائه الگوریتم جدید افت فشار نقائص عمده‌ای را حل کرد که کلیات آن را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در طی اصلاح شبکه، افت فشار مجاز هر جریان ثابت نگاه داشته می‌شود. بنابراین پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود باقی می‌مانند.

- اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی با استفاده از افت فشار مناسب صورت می‌گیرد، به صورتی که هر مبدل از شبکه، اعم از جدید یا قدیم، مناسب‌ترین استفاده از افت فشار جریانهای متصله را داراست و این امر بصورت همزمان با هدف گذاری‌های انرژی و سرمایه گذاری لازم صورت می‌گیرد.

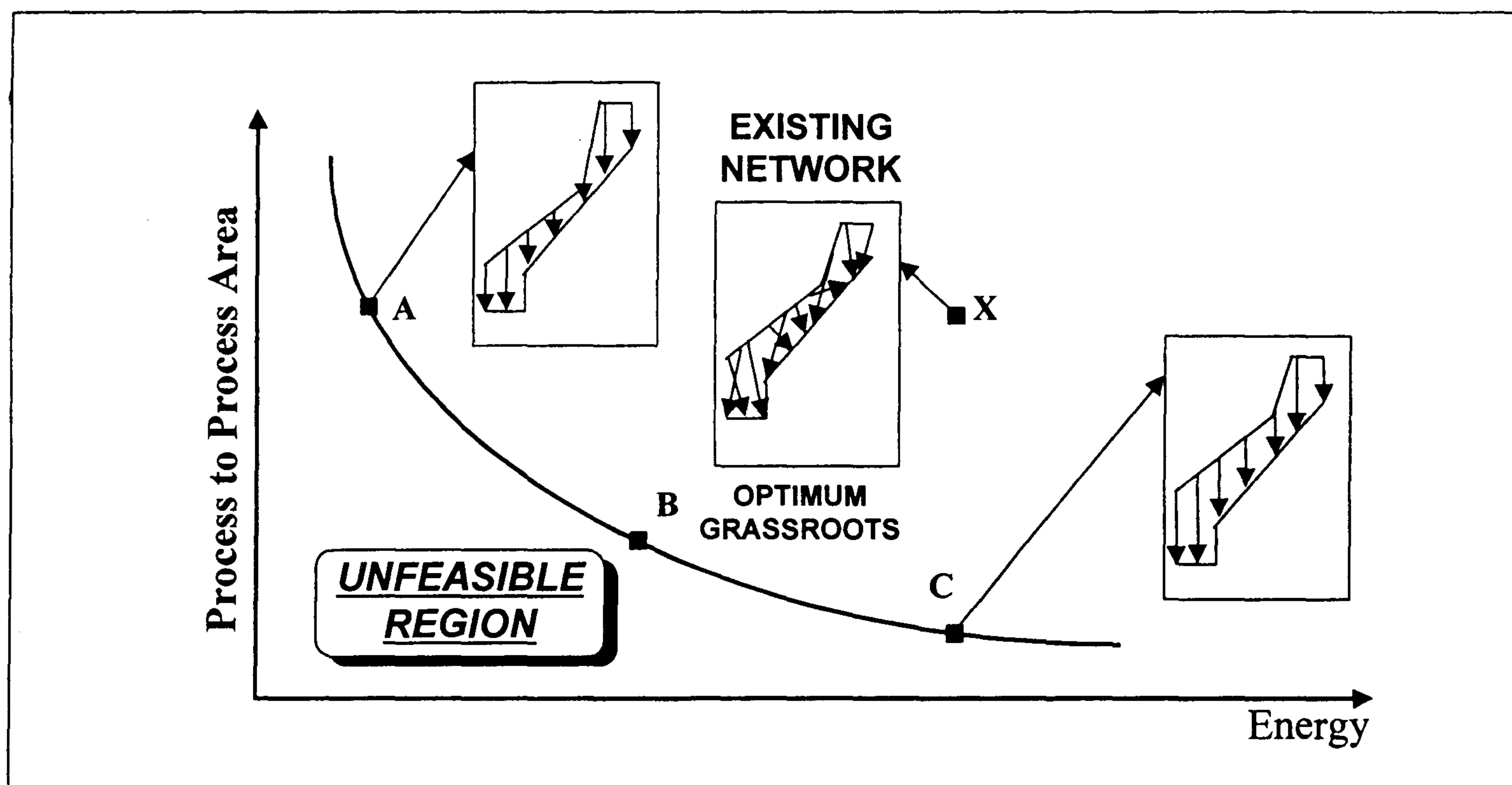
می‌توانیم به بهترین وجه ممکن دیدگاه اصلی پروژه را با هر دو پارامتر تعیین کننده اقتصادی هماهنگ سازیم.

روشهای معمول هدف گذاری اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی

هدف گذاری با استفاده از روش α ثابت

منحنی سطح - انرژی معنای کلی پروژه های اصلاحی را بیان می‌کند. در مبحث اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی هر موقع که نامی از سطح شبکه به میان بیاید، منظور همان سطح بازیابی انرژی و یا همان سطح مربوط به مبدلهای فرآیند به فرآیند^۳ می‌باشد [۲]. این منحنی مقایسه‌ای است بین عملکرد واحد موجود با آنچه که می‌توانست باشد (نقطه X در شکل ۱).

احتیاجات عمده برای هدف های مورد لزوم در طراحی تفصیلی توسط Tjoe و Linnhoff [۲] بیان گردید. آنها در ابتدا نشان دادند که مقدار انرژی صرفه جوئی شده (که صورت اصلی مسئله اصلاح شبکه است) ارتباط مستقیم با دوره بازگشت سرمایه^۱ دارد و هرچقدر صرفه جوئی انرژی بیشتر شود، مدت زمان دوره بازگشت سرمایه نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین تنها یک پارامتر اقتصادی برای هدف گذاری کافی نیست و باید پارامتر دیگری نیز معرفی گردد تا هدف گذاری تعیین شود. یکی از بهترین پارامترهای ممکن مقدار سقف سرمایه گذاری^۲ برای مبدلهای جدید می‌باشد. ولی با بیان بحث های جدید، می‌توان سرمایه گذاری را برای امکان خرید و نصب پمپ و کمپرسورهای جدید دخالت داد. حال اگر مقدار صرفه‌جوئی انرژی را با مقدار سرمایه گذاری ارتباط دهیم،



شکل ۱: منحنی انرژی - سطح برای یک مجموعه از اطلاعات جریانی.

باید شبکه موجود (نقطه X) به سمت شبکه ایدآل واقع بر روی منحنی ایدآل (همچون نقطه A) حرکت کند. بنابراین، برای اعمال تغییرات لازم بر روی شبکه موجود و با سرمایه گذاری لازم، مسیری همچون مسیر نشان داده شده در شکل (۲) لازم است تا هدف گذاری انجام شود. مسیر اصلاح شبکه را نمی‌توان به سادگی تعیین نمود. یکی از

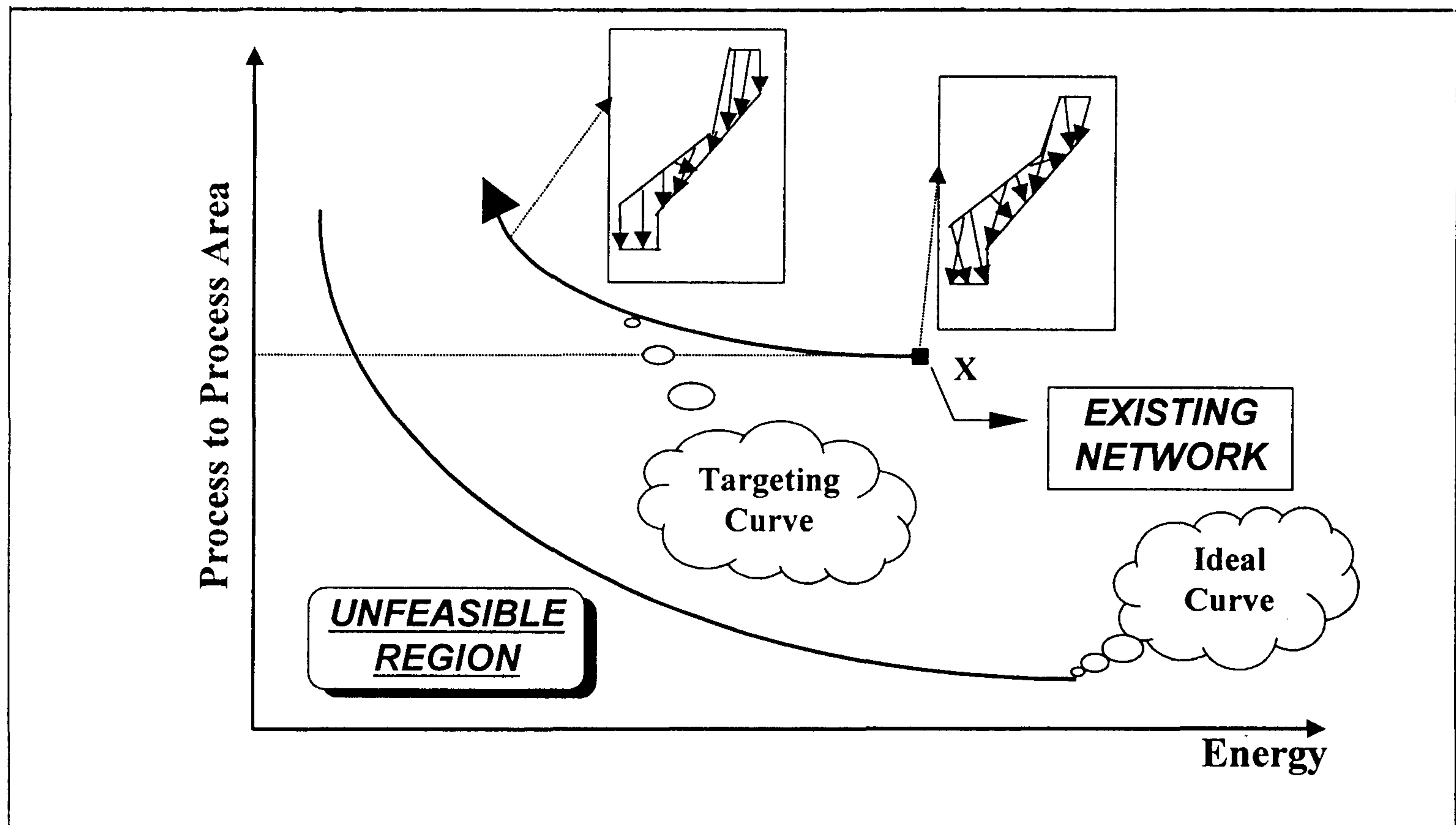
باتوجه به شکل (۱) می‌توان دریافت که شبکه موجود (نقطه X) در مقایسه با یک شبکه ایدآل با همان مصرف انرژی (نقطه C) دارای سطح شبکه بیشتری می‌باشد. همینطور شبکه موجود در مقایسه با شبکه ای ایدآل با همان مقدار سطح شبکه (نقطه A)، دارای مصرف انرژی بیشتری است. سپس Tjoe و Linnhoff [۲] نشان دادند که برای اصلاح شبکه

پارامترهای کمک کننده برای یافتن مسیر اصلاح، سطح بکار رفته در شبکه و در طی اصلاح نسبت به مقدار سطح ایدال شبکه است. در نتیجه می توان نسبتی را به عنوان بازدهی سطح تعیین نمود و مسیر اصلاحی شبکه را به گونه ای تفسیر کرد که در طول مسیر این نسبت (α) ثابت باقی بماند [۲]. بیان بازدهی سطح می تواند

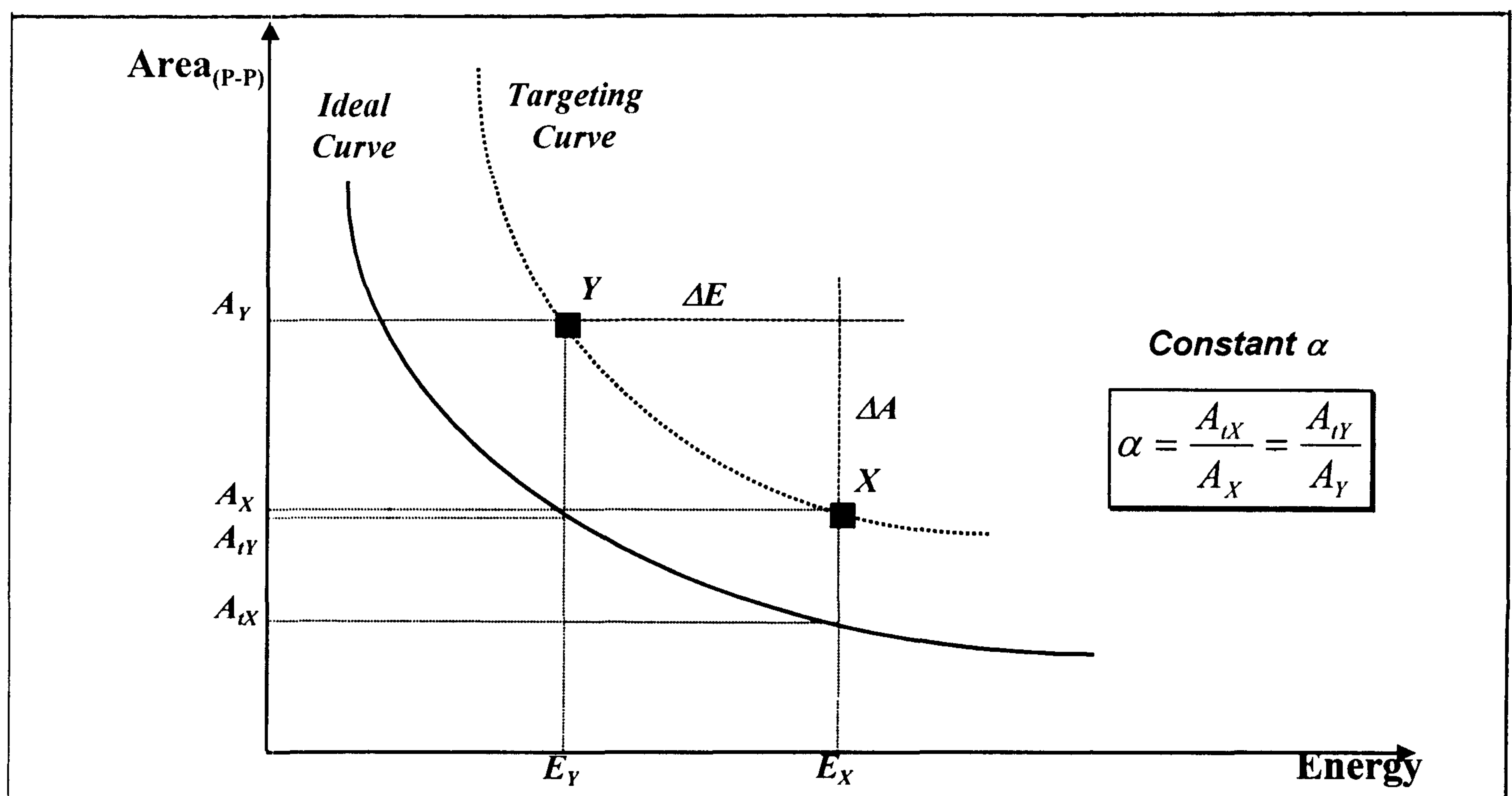
بصورت زیر نشان داده شود:

$$\alpha = \frac{A_{Ideal (Point C)}}{A_{Existing (Point X)}} \quad (1)$$

منحنی هدف گذاری مربوطه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲: نمونه ای از یک مسیر اصلاح.



شکل ۳: منحنی هدف گذاری اصلاحی (α ثابت).

روش جدید هدف گذاری اصلاحی

با بکارگیری سطح مورد بحث در شکل (۱) و همچنین با انتخاب مسیر اصلاحی پیشنهادی توسط Tjoe و Linnhoff [۲] یا روش تعمیم یافته Silangwa [۳]، می توان با اعمال تئوری افت فشار [۱] سطح لازم را برای شبکه بدست آورد، بطوریکه تمامی ملاحظات لازم برای اطلاعات جریانی منظور گردد. برای این کار، برخی نکات باید مدنظر قرار گیرد. از جمله این نکات ملاحظات مربوط به چند عبوره بودن^۳ مبدل‌های شبکه و همچنین تعیین افت فشار هرکدام از جریانهای شبکه است. بدینصورت که تک تک مبدل‌های موجود در شبکه تحت بررسی قرار می‌گیرد تا افت فشار هرکدام از دو سمت آن تعیین شده و برای تعیین افت فشار مجاز فرآیند به فرآیند [۲] مقادیر واقعی منظور گردد.

تعیین نوع مسیر اصلاحی

با رجوع به شکل شماره (۲) مشاهده می‌شود که منحنی ایدآلی وجود دارد که تغییرات سطح لازم شبکه را برای تبادل حرارتی فرآیند به فرآیند [۲] نسبت به حداقل انرژی لازم شبکه نشان می‌دهد. در مجاورت با این منحنی، منحنی هدف گذاری وجود دارد، که چگونگی حرکت مسیر اصلاح سازی شبکه را تحت ثابت ماندن افت فشار مجاز هر یک از جریانها نشان می‌دهد [۱]. این منحنی هدف گذاری را می‌توان با هر دو روش α ثابت [۲] و یا α فزاینده [۳] بدست آورد. اما اگر بهینه سازی افت فشار را وارد بحث کنیم، چگونه می‌توان منحنی هدف گذاری را رسم کرد؟

برای استراتژی حل این مسئله، دو راه حل مختلف را می‌توان ارائه داد. این دو راه حل به اینصورت طبقه بندی می‌شوند:

الف - مسیر برای بهینه سازی افت فشار در جهت حداقل کردن دوره بازگشت

ب - مسیر برای بهینه سازی افت فشار در جهت حداقل کردن مقدار سرمایه گذاری

در روش (الف) در حقیقت تابع هدف برای بهینه سازی افت فشار، مقدار دوره بازگشت است که از تقسیم سرمایه گذاری (I_T) بر مقدار صرفه جوئی (S_T) حاصل می‌شود. در این روش منحنی هدف‌گذاری به دست آمده (منحنی شماره ۱ شکل ۴) همواره زیر منحنی هدف‌گذاری براساس افت فشار ثابت قرار می‌گیرد (منحنی شماره ۳ شکل ۴). هرچه این دو منحنی به سمت نقطه شبکه موجود جلو می‌روند، به سمت یکدیگر میل کرده و در نقطه شبکه موجود به یکدیگر می‌رسند. این همگرایی به این دلیل است که هیچگونه بهینه سازی افت فشار در نقطه شبکه موجود نمی‌تواند

هدف گذاری با استفاده از روش α فزاینده^۱

روش α ثابت نمی‌تواند بصورت کلی یک محدوده قابل قبول را برای یک اصلاح خوب مهیا کند [۳]، چون منحنی هدف گذاری خیلی بیشتر از آنچه مورد لزوم است حد ایمنی رعایت می‌کند. [Silangwa ۳] پیشنهاد کرد که اگر بازدهی سطح شبکه موجود برابر $0/9$ یا کمتر باشد، بهتر است از منحنی هدف گذاری که موازی با منحنی ایدآل می‌باشد، استفاده شود. در این نوع هدف گذاری با بیشتر شدن مقدار صرفه جوئی انرژی، بازدهی سطح شبکه بهبود می‌یابد.

تعریف جدید صرفه جوئی^۲ و سرمایه گذاری

در اینجا با ملاحظه تاثیر تجهیزات رانشی سیال، تعریفی جدید برای صرفه جوئی و سرمایه گذاری عنوان می‌کنیم تا در قسمت‌های بعد با درج تئوری بهینه سازی افت فشار در اصلاح شبکه‌های موجود، تعریف جامعی از دوره بازگشت سرمایه و سرمایه گذاری داشته باشیم.

تا به حال هر جا که سخن از صرفه جوئی به میان می‌آمد، صرفاً مقدار بازیابی انرژی بود که با کم کردن مقدار ΔT_{min} حاصل می‌شد. اما اگر پمپ و کمپرسورهای موجود با پمپ و کمپرسورهای قوی‌تر جایگزین شوند، تفاوت مقدار توان مصرفی از صرفه جوئی انرژی کم می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت:

$$S_T = S_{Energy} - S_{Power} \quad (2)$$

از طرفی مقدار سرمایه گذاری نیز علاوه بر سرمایه گذاری برای سطوح مبدل‌های حرارتی جدید شبکه، در صورت لزوم، سرمایه گذاری برای پمپ و یا کمپرسورهای جدید نیز به جهت بالا بردن افت فشار مجاز جریانهای موجود در شبکه می‌باشد، بنابراین:

$$I_T = I_{Area} + I_{Pump} + I_{Compressor} \quad (3)$$

که در آن:

$$I_{Pump} = \sum_{i=1}^{Np} I_{P_i} \quad (4)$$

$$I_{Compressor} = \sum_{i=1}^{Nc} I_{C_i} \quad (5)$$

حال با داشتن S_T و I_T می‌توان منحنی سرمایه گذاری - صرفه‌جوئی را رسم نمود. در این منحنی خطوط مختلف دوره بازگشت به سادگی قابل رسم است.

شبکه را بهبود بخشد. به عبارت دیگر در نقطه ای که هیچگونه صرفه جوئی از طریق کاهش مصرف انرژی نداریم، نمی توانیم توان مصرفی تجهیزات رانشی سیال شبکه را بی دلیل بالا ببریم، چرا که سبب منفی شدن مقدار کل صرفه جوئی (S_T) می شود.

علت کمتر بودن سطح شبکه حاصل از منحنی شماره ۱ نسبت به منحنی شماره ۳ شکل (۴)، بالا رفتن نسبی مقادیر افت فشار مجاز هریک از جریانهاست که توسط جایگزین شدن پمپ یا کمپرسورهای قوی تر درون شبکه تامین می شود. در نتیجه مقدار ضریب انتقال حرارت بیشتری شامل هریک از جریانها شده و سبب پائین آمدن سطح شبکه می گردد. اما در اینجا یک تقابل^۱ بین قیمت پمپ و کمپرسور و توان مصرفی آنها و قیمت سطح شبکه وجود دارد، که در هر مقدار مصرف انرژی شبکه، در نتیجه این تقابل بهترین افت فشار مجاز برای هر جریان بدست می آید.

در روش (ب)، تابع هدف برای بهینه سازی افت فشار، مقدار سرمایه گذاری جهت اصلاح شبکه انتخاب شده است. این مقدار سرمایه گذاری (I_T) که مجموع سرمایه گذاری های سطح، پمپ و کمپرسور است، تابعی مستقیم از افت فشار مجاز جریانها می باشد. در این نوع بهینه سازی افت فشار، بدون ملاحظه توان مصرفی تجهیزات رانشی سیالات درون شبکه، اقدام به حداقل سازی سرمایه گذاری در جهت اصلاح شبکه می شود. بدینصورت که در هر مقدار مصرف انرژی شبکه، تقابل بین قیمت خرید و نصب پمپ و کمپرسور با سرمایه گذاری سطح شبکه انجام میگردد. واضح است که چون در اینجا هیچ حرفی از مقدار توان مصرفی پمپ و کمپرسور به میان نمی آید، عامل بازدارنده از دیاد افت فشار مجاز جریانها از بین رفته، و افت فشارهای مجاز بالاتری را می توان نسبت به حالت (الف) که بهینه سازی افت فشار به جهت حداقل کردن دوره بازگشت سرمایه بود، تامین نمود. بنابراین مسیر منحنی هدف گذاری این حالت یعنی منحنی شماره ۲ شکل (۴)، پائین ترین مکان را به خود اختصاص می دهد. بسیار روشن است که مقدار دوره بازگشت بدست آمده از این مسیر بیشتر از مسیر ارائه شده در حالت (الف) است، چرا که بالا رفتن توان مصرفی پمپ ها و کمپرسورها سبب کاهش مقدار کل صرفه جوئی (S_T) شده و در نتیجه دوره بازگشت افزایش می یابد.

بنابراین با تعریف جدید مکان هندسی منحنی ایدآل و با بهره گیری از روشهای نسبت سطح (α) علاوه بر منحنی های ایدآل و هدف گذاری با استفاده از روش افت فشار ثابت، دو دسته منحنی جدید بوجود آمد که بسته به مقادیر تعریف شده سقف سرمایه گذاری و حد مقرر شده دوره بازگشت، می توان یکی از این

دو روش را انتخاب کرد.

همانطور که در شکل (۴) می توان دید، مقدار انرژی مصرفی شبکه توسط حالت های مختلف بوجود آمده توسط بهینه سازی افت فشار کمتر از مقدار انرژی مصرفی شبکه در حالت افت فشار ثابت است. بنابراین، اگر با بهره گیری از روشهای افت فشار یک شبکه موجود را اصلاح کنیم، پس از سپری شدن دوره بازگشت سرمایه گذاری، همواره مقدار انرژی مصرفی کمتری برای شبکه مبدلهای حرارتی اصلاح شده خواهیم داشت. شایان ذکر است که در تمامی حالت های شکل (۴)، باید دیدگاه های اقتصادی پروژه برای انتخاب مسیر هدف گذاری مدنظر قرار گیرند.

روش اصلاح شبکه به سمت اهداف هدف گذاری شده

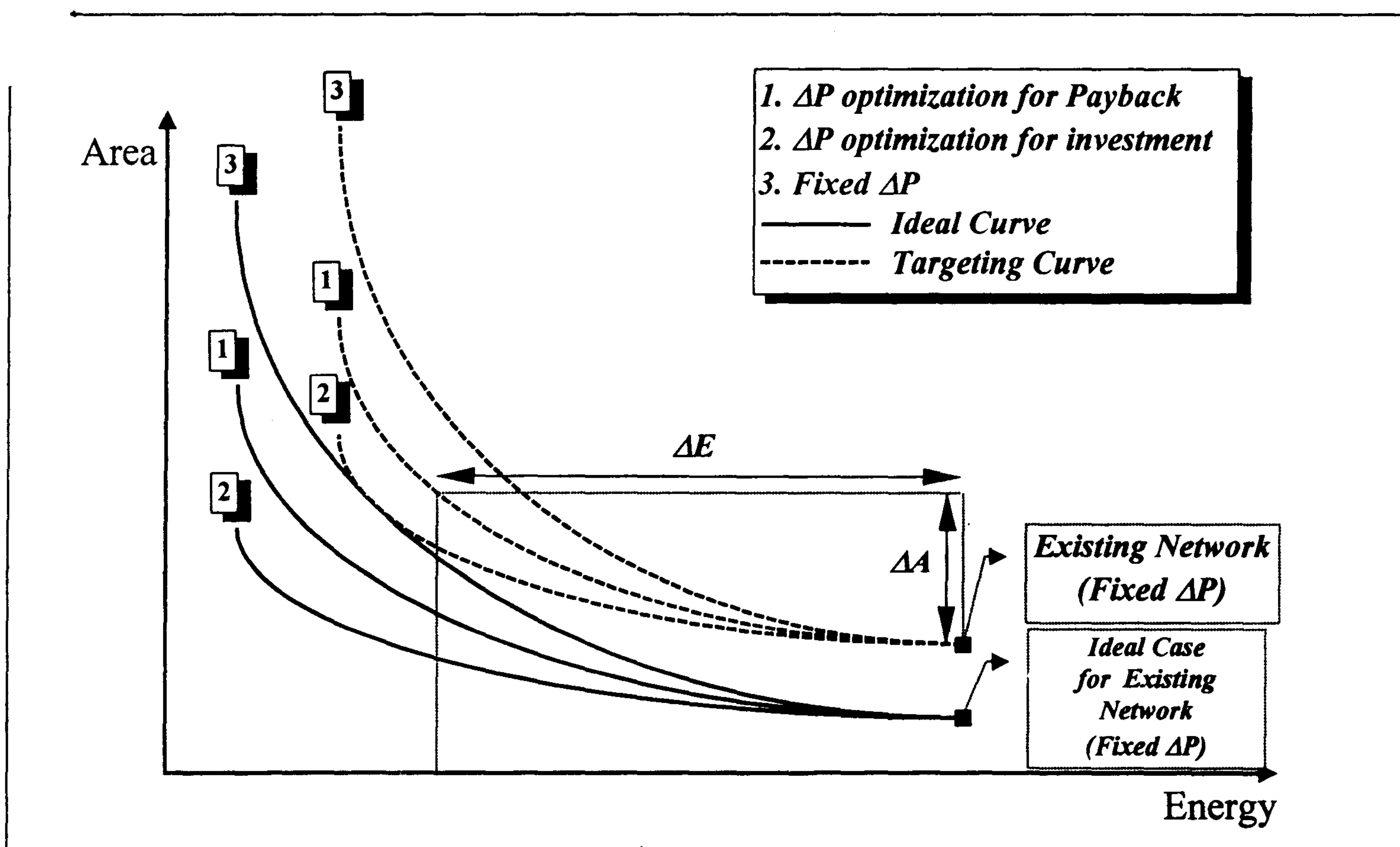
همانگونه که در قسمت تعیین نوع مسیر اصلاحی برای روش جدید هدف گذاری بیان گردید، با تغییر افت فشار مجاز جریانهای شبکه، بهترین نوع هدف گذاری پیشنهاد شده و در نهایت برای هر جریان، بهترین افت فشار مجاز ارائه می شود. حال برای طراحی تفصیلی اصلاح شبکه، با داشتن افت فشارهای مجاز بهینه شده و روش پیشنهادی الگوریتم افت فشار ثابت [۷]، می توان به مقاصد هدف گذاری شده نزدیک شد.

مسئله مورد مطالعه

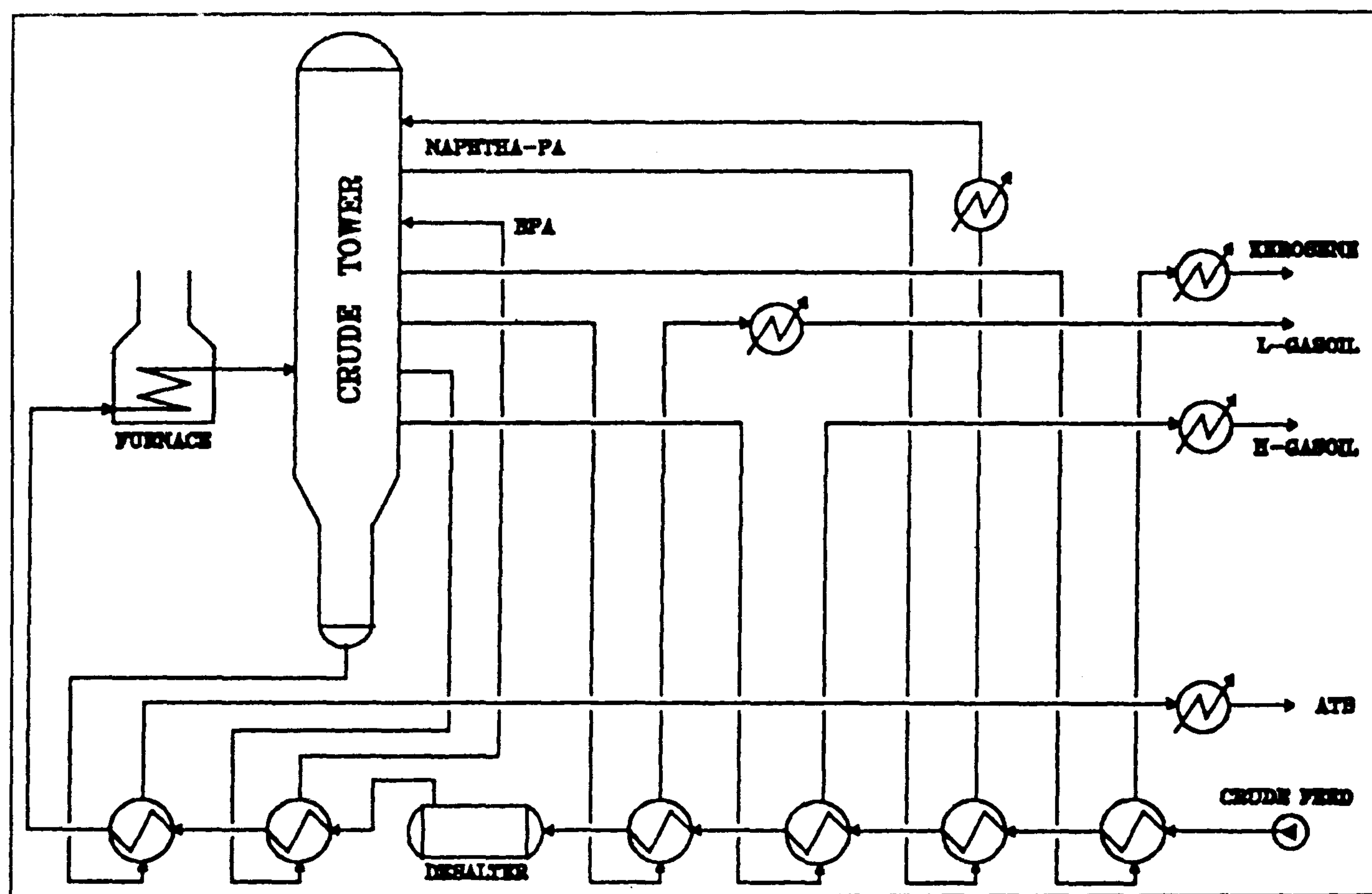
فرآیندی که روش جدید بهینه سازی افت فشار را در رابطه با اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی موجود بخوبی بیان می کند، واحد پیش گرم کن نفت خام می باشد. علت دیگر انتخاب این فرآیند نمونه، مقایسه روش جدید اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی با روش افت فشار ثابت [۱] می باشد. از این به بعد، روند قدم به قدم اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی مسئله نمونه، از هدف گذاری تا طراحی تفصیلی نشان داده می شود.

نمودار جریانی فرآیند

نمودار جریانی فرآیند در شکل شماره (۵) بصورت ساده نمایش داده شده است. همانطور که در شکل موردنظر دیده می شود، خوراک نفت خام در دو قسمت و توسط محصولات داغ برج تقطیر گرم می شود. اولین قسمت از ناحیه مخزن تا واحد نمک زدا را پوشش می دهد، و دومین قسمت از واحد نمک زدا شروع شده و به برج تقطیر ختم می شود. در نهایت جریان نفت خام توسط کوره گرم شده تا وارد برج تقطیر گردد.



شکل ۴: منحنی های هدف گذاری بر حسب بهینه سازی افت فشار.

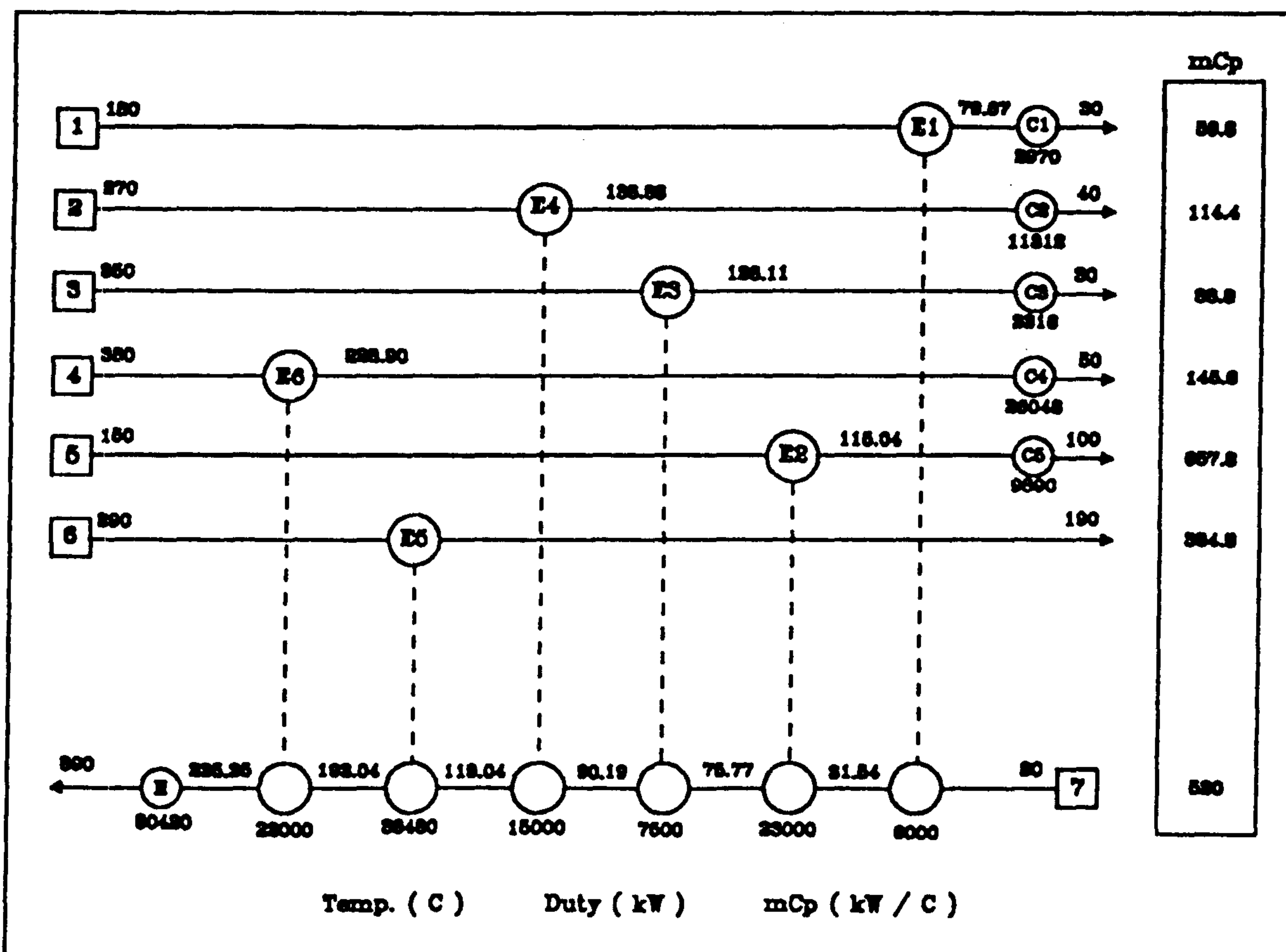


شکل ۵: نمودار جریانی واحد پیش گرم نفت خام.

شبکه موجود

شبکه مبدل‌های حرارتی نشان داده شده در شکل (۶)، در واقع رسم شبکه مبدل‌های حرارتی نمودار جریانی شکل (۵) می‌باشد که دماها، بارهای حرارتی، مقدار جریان جرمی حرارتی و اتصالات

مربوطه در آن نشان داده شده است. جریانهای گرم بصورت ۱ تا ۶ گروه بندی شده‌اند و تنها یک جریان سرد وجود دارد (نفت خام) که با عدد ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶: شبکه موجود واحد پیش گرم نفت خام.

شود. این اطلاعات بصورت جدول شماره (۳) خلاصه شده اند.

تحلیل مبدل‌های حرارتی موجود

محاسبات را با تحلیل مبدل‌های موجود آغاز می‌کنیم. این عمل باعث تعیین ضرائب انتقال حرارت تمیز، مقاومت های رسوب دهی و افت فشارهای مجاز قابل دسترسی برای استفاده انتقال حرارت می‌شود. این تحلیل با بکارگیری برنامه‌ای که با روش Bell-Delaware کار می‌کند، قابل اجراست. نتایج نهائی در جدول (۴) نشان داده شده است.

تخمین افت فشار مجاز جریانها

با داشتن افت فشار لوله و همینطور افت فشار سمت پوسته

برای تخمین افت فشارهای مجاز جریانها که سبب انتقال حرارت می‌شوند، مبدل‌های موجود باید تحت بررسی قرار گیرند. مشخصات مبدل‌های حرارتی در جدول (۱) آورده شده اند:

خواص فیزیکی

مقادیر مختلف خواص فیزیکی هرکدام از جریانهای موجود در شبکه، همراه با مقدار جریانهای مربوطه، بصورت جدول (۲) ارائه می‌شود.

اطلاعات اقتصادی

علاوه بر اطلاعات فرآیندی مندرج در جدول (۲) احتیاج به اطلاعات اقتصادی نیز هست تا صورت اصلی هدف مسئله روشن

جدول ۱: مشخصات مبدل‌های موجود واحد پیش گرم نفت خام.

E6	E5	E4	E3	E2	E1	مشخصه
ATB	BPA	LGO	HGO	Naph.	Kero.	طرف پوسته
Crude	Crude	Crude	Crude	Crude	Crude	طرف لوله
۱۳۶۰	۲۷۶۰	۸۰۰	۲۸۰	۱۴۸۰	۲۸۰	سطح (m ^۲)
۱×۴	۲×۳	۱×۲	۱×۱	۱×۱	۱×۱	سری × موازی
۱۱۴۳	۱۲۱۹	۱۱۴۳	۹۴۰	۱۵۴۲	۹۴۰	قطر داخلی پوسته (mm)
۵۰۹/۱	۶۰۵/۱	۴۱۹/۳	۱۹۷/۳	۱۲۴۶/۴	۲۵۵/۳	فاصله بافل (mm)
۱۵۹۰	۱۸۱۰	۱۵۹۰	۱۰۷۵	۲۸۲۷	۱۰۷۵	تعداد لوله
۲	۲	۲	۲	۲	۲	تعداد عبورها
۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	قطر داخلی لوله (mm)
۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	قطر خارجی لوله (mm)
۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	فاصله کام لوله (mm)

جدول ۲: مقدار جریان و خواص فیزیکی جریانهای واحد پیش گرم نفت خام.

λ (W/m ^۲ °C)	μ (cP)	C_p (J/kg° C)	ρ (kg/m ^۳)	مقدار جریان (kg/s)	نام جریان	جریان
۰/۱۲	۰/۳	۲۶۰۰	۷۰۰	۲۳	Kero.	۱
۰/۱۲	۰/۴	۲۶۰۰	۷۰۰	۴۴	LGO	۲
۰/۱۲	۰/۵	۲۶۰۰	۷۵۰	۱۳	HGO	۳
۰/۱۲	۰/۵	۲۶۰۰	۷۵۰	۵۶	ATB	۴
۰/۱۲	۰/۲	۲۶۰۰	۶۳۰	۲۵۳	Naphtha	۵
۰/۱۲	۰/۴	۲۶۰۰	۷۵۰	۱۴۸	BPA	۶
۰/۱۲	۱/۰	۲۶۰۰	۸۰۰	۲۰۰	Crude	۷

جدول ۳: اطلاعات اقتصادی و دیدگاه پروژه واحد پیش گرم نفت خام.

اطلاعات اقتصادی	
هزینه گرمایش :	70 £/kW-yr
هزینه سرمایش :	7 £/kW-yr
هزینه نصب مبدل :	$8600 + 670 (\text{Area})^{1/83} \text{ £}$
هزینه نصب پمپ :	$8600 + 7310 (q\sqrt{H})^{1/20} \text{ £}$ با بازدهی هیدرولیکی ۷۰٪
دیدگاه پروژه	
سقف سرمایه گذاری:	$2/000/000 \text{ £}$
حداکثر دوره بازگشت:	۱/۵ سال

جدول ۴: عملکرد مبدلهای موجود.

مشخصه	E1	E2	E3	E4	E5	E6
$h_{i0}(\text{W/m}^2\text{°C})$	۱۹۴۷/۲	۸۹۸/۰	۱۹۴۷/۲	۱۴۲۲/۶	۷۳۶/۶	۱۴۲۲/۶
$h_o(\text{W/m}^2\text{°C})$	۱۶۹۰/۲	۲۴۳۲/۹	۱۱۴۴/۶	۱۴۸۵/۶	۱۵۷۷/۶	۱۴۱۹/۷
$\Delta P_t (\text{kPa})$	۳۲/۸۳۵	۱۱/۵۶۰	۳۲/۸۳۵	۳۱/۲۷۲	۱۰/۷۷۶	۵۳/۱۶۴
$\Delta P_s (\text{kPa})$	۴۵/۶۳۴	۶۵/۳۶۳	۲۹/۴۷۶	۵۹/۸۸۶	۷۴/۷۶۳	۸۵/۹۶۴
$R_{fio}(\text{m}^2\text{°C/W})$	۰/۰۰۱۴۴	۰/۰۰۱۳۷	۰/۰۰۱۴۰	۰/۰۰۱۴۲	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۱۴۲
$R_{fo}(\text{m}^2\text{°C/W})$	۰/۰۰۱۴۴	۰/۰۰۱۳۷	۰/۰۰۱۴۰	۰/۰۰۱۴۲	۰/۰۰۱۵۷	۰/۰۰۰۱۴۲

جدول ۵: اطلاعات جریانی.

شماره جریان	دمای ابتدائی (°C)	دمای هدف (°C)	CP(kW/°C)	ΔP(kPa)
۱	۱۸۰/۰	۳۰/۰	۵۹/۸	۴۵/۶۳۴
۲	۲۷۰/۰	۴۰/۰	۱۱۴/۴	۵۹/۸۸۶
۳	۳۵۰/۰	۳۰/۰	۳۳/۸	۲۹/۴۷۶
۴	۳۸۰/۰	۵۰/۰	۱۴۵/۶	۸۵/۹۶۴
۵	۱۵۰/۰	۱۰۰/۰	۶۵۷/۸	۶۵/۳۶۳
۶	۲۹۰/۰	۱۹۰/۰	۳۸۴/۸	۷۴/۷۶۳
۷	۲۰/۰	۳۹۰/۰	۵۲۰/۰	۱۷۲/۴۴۲

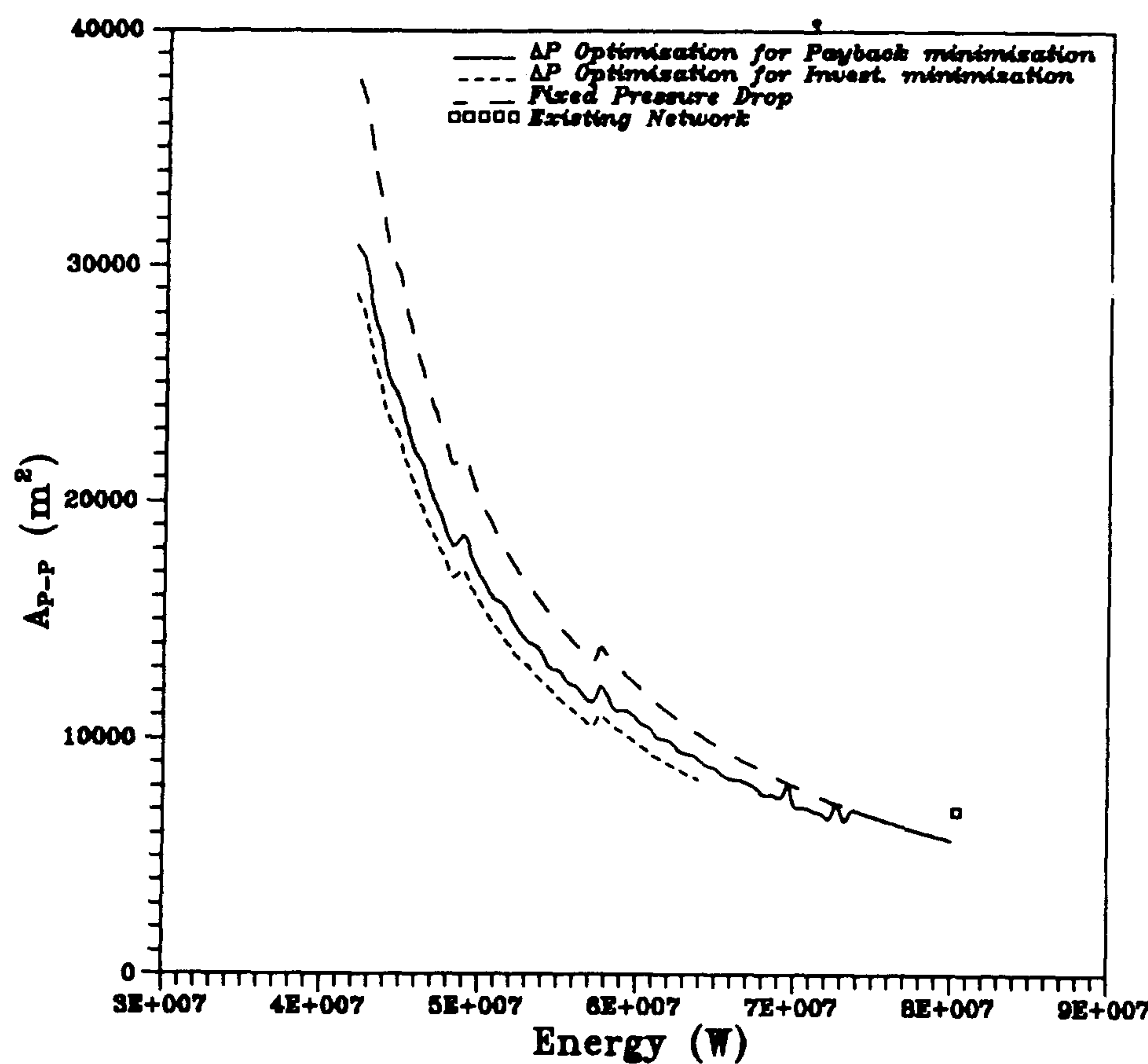
می‌توان نمودار سطح - انرژی را رسم نمود. بخاطر نشان دادن اهمیت بهینه سازی افت فشار، نتیجه هدف گذاری بصورت شکلهای (۶) تا (۸) با حالت‌های مختلف رفتاری افت فشار نشان داده شده‌اند.

حال این سؤال مطرح می‌باشد که کدامیک از منحنی‌های ایدآل را برای رسم منحنی هدف گذاری انتخاب کنیم تا بوسیله آن روند هدف گذاری اصلاح شبکه تعیین گردد.

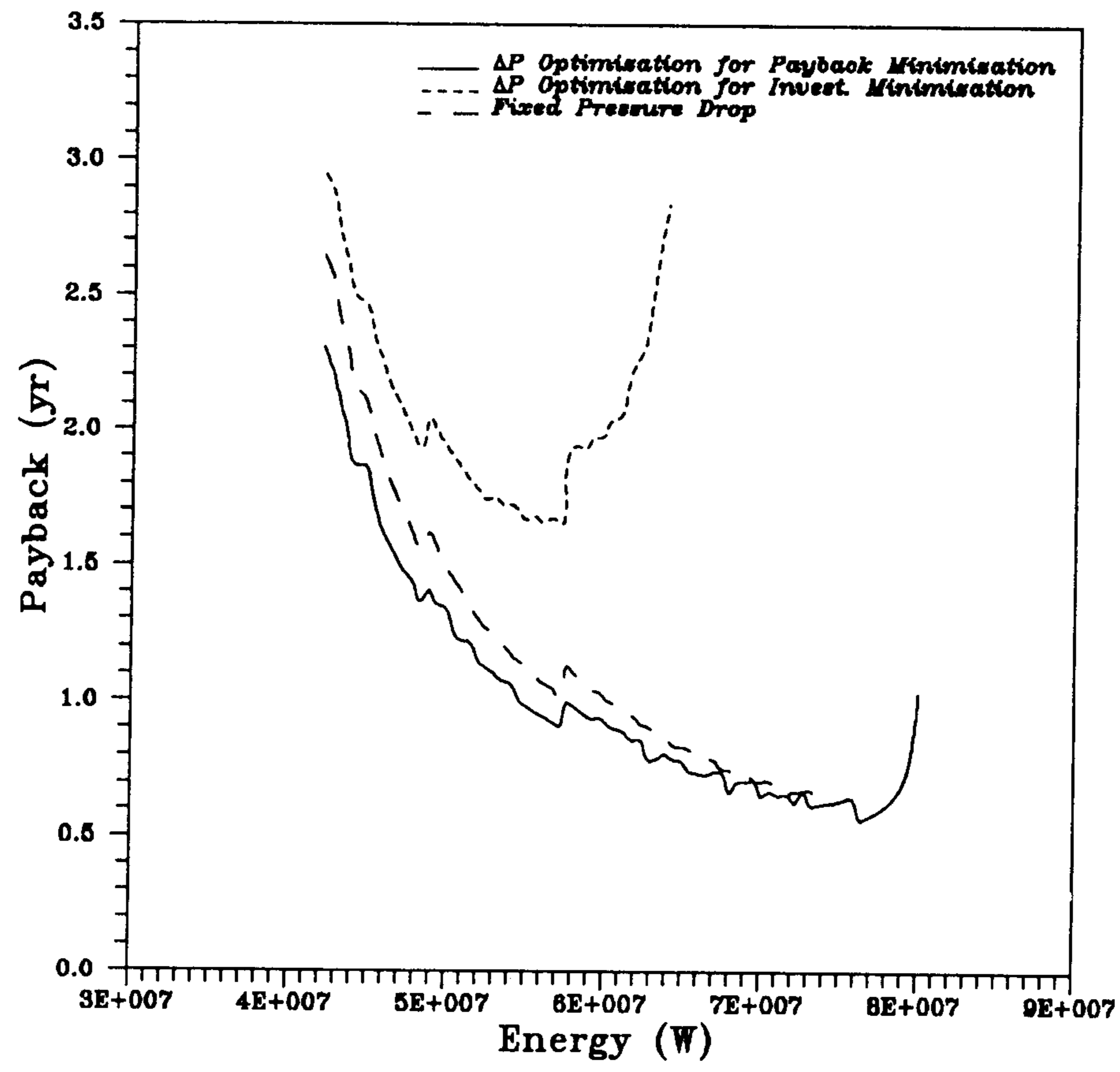
هرکدام از مبدلهای حرارتی، به راحتی می‌توان افت فشار مجاز هرکدام از جریانها را در قسمت فرآیند به فرآیند [۱] و صرفاً جهت بازیافت حرارت بدست آورد. باتوجه به توضیحات گفته شده، می‌توان جدول اطلاعاتی (۵) را ارائه نمود.

هدف گذاری و انتخاب روش مناسب

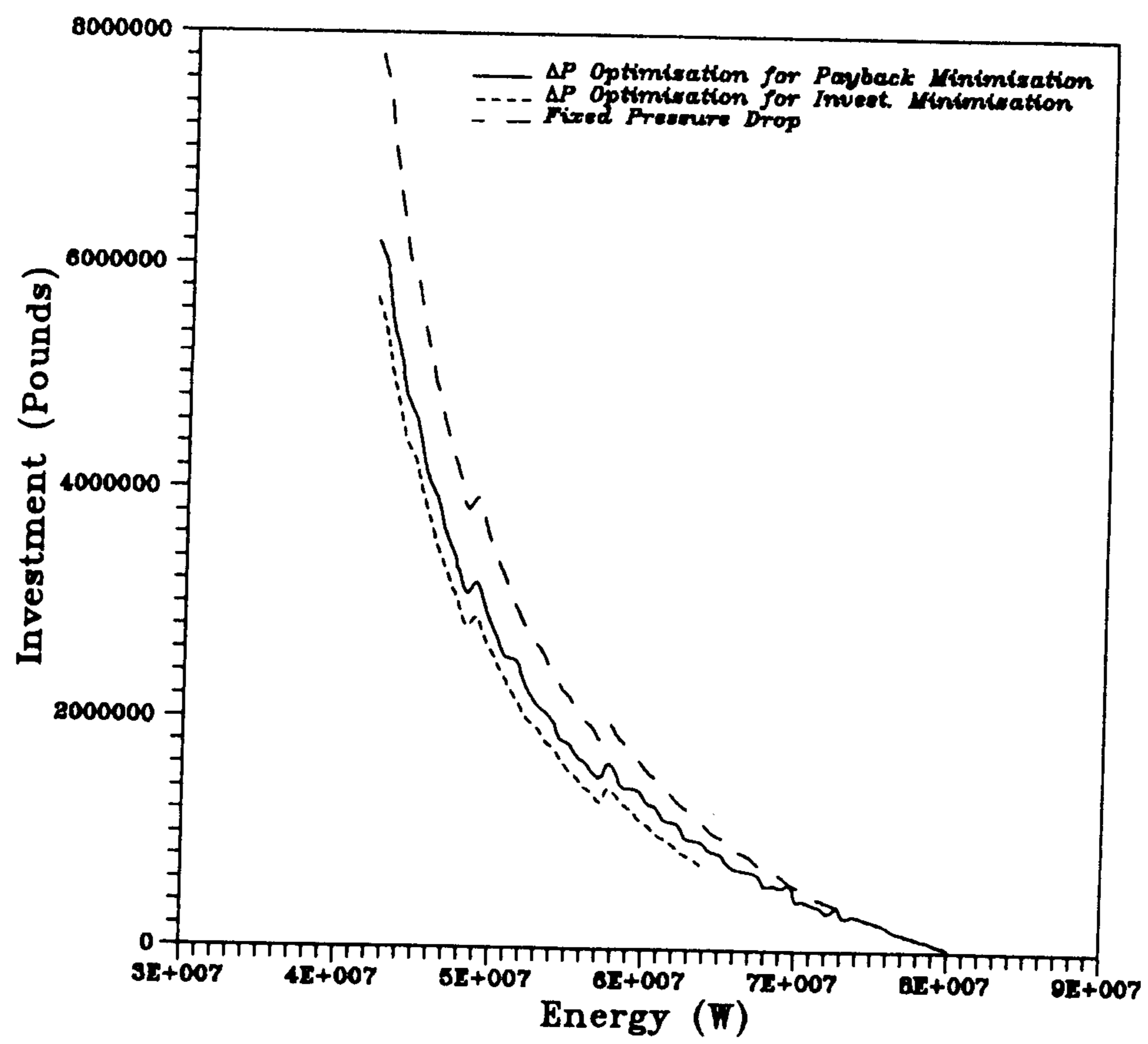
با در نظر گرفتن جداول (۳) و (۵) و باتوجه به مطالب گفته شده،



شکل ۶: منحنی ایدآل برای هدف گذاری.



شکل ۷: دوره بازگشت برحسب حالت‌های مختلف بهینه سازی افت فشار.



شکل ۸: مقدار سرمایه گذاری لازم برحسب حالت‌های مختلف بهینه سازی افت فشار.

باتوجه به شرایط اقتصادی پروژه که در جدول (۳) نشان داده شد، و هدف گذاری اصلاحی پروژه را بصورت جدول (۶) برای هرکدام از حالت‌های بهینه‌سازی افت فشار مطرح نمود.

جدول ۶: نتایج هدف گذاری اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی واحد پیش گرم نفت خام.

حدافل Investment	حدافل Payback	افت فشار ثابت	
۲۹/۷۸	۳۲/۱۶	۳۶/۹۰	ΔT_{min} هدفگذاری شده، °C
۱/۷۴۷	۱/۰۹۲	۱/۰۶۴	دوره بازگشت سرمایه، سال

جدول ۷: ضرائب انتقال حرارت و افت فشارهای بهینه شده جریانهای مختلف در $\Delta T_{min} = 32/16^{\circ}C$.

$\alpha_{tar} = 0/912 =$ بازدهی سطح هدفگذاری شده					
شماره جریان	نام جریان	سمت مبدل	h هدفگذاری شده (W/m ² °C)	افت فشار (kPa)	سطح تماس (m ²)
۱	kerosene	Shell	۵۳۹/۱۶	۲۸۱/۶۳۳	۳۶۰/۴۰
۲	LGO	Shell	۵۱۲/۳۳	۹۳۷/۲۵۷	۱۷۹۱/۷۳
۳	HGO	Shell	۴۷۲/۴۵	۲۱۷/۹۲۸	۸۶۳/۳۱
۴	ATB	Shell	۴۹۴/۹۴	۴۹۷/۰۴۶	۳۸۸۶/۹۲
۵	Naphtha	Shell	۵۹۹/۳۷	۳۶۶/۹۸۸	۲۰۲۲/۷۰
۶	BPA	Shell	۴۸۷/۹۲	۴۲۴/۰۴۵	۴۵۷۰/۴۶
۷	Crude	Tube	۳۹۴/۲۹	۱۰۶۶/۴۱۰	۱۳۴۹۵/۴۶

جهت کاربرد ابزار مورد احتیاج اصلاح شبکه که همان افت فشار مجاز و ضریب انتقال حرارت هر جریان می‌باشد، بدست آید. جدول (۷) بیانگر این مطلب است.

حال در ابتدا مبدلهای موجود را تحت تحلیل مسئله باقیمانده^۱ قرار داده و سپس مبدلهای با بهره‌گیری از ابزاری همچون منحنی نیروی رانش دمائی^۲ و قانون افت فشار ایدآل [۷ و ۱] و مفاهیم بنیادی پینچ اصلاح می‌شوند.

تحلیل مبدلهای موجود

شکل (۹) نشان دهنده مکان مبدلهای موجود شبکه بر روی

بنابراین باتوجه به جدول (۶) و با ذکر این نکته که حداکثر دوره بازگشت سرمایه نباید از ۱/۵ سال بیشتر شود، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین حالت هدف گذاری اصلاحی شبکه مورد مطالعه، هدف گذاری در سمت بهینه سازی افت فشار به منظور حداقل کردن دوره بازگشت سرمایه است.

ضرائب انتقال حرارت و افت فشارهای بهینه

حال که نقطه هدف گذاری شده معین گردید، کفایت افت فشارهای بهینه شده و همچنین ضرائب انتقال حرارت بدست آمده در این نقطه را از محاسبات کلی بیرون بکشیم تا متغیرهای لازم

منحنی نیروی رانشی دمائی قبل از اصلاح شبکه است.

آنالیز مبدلها نشان می دهد که :

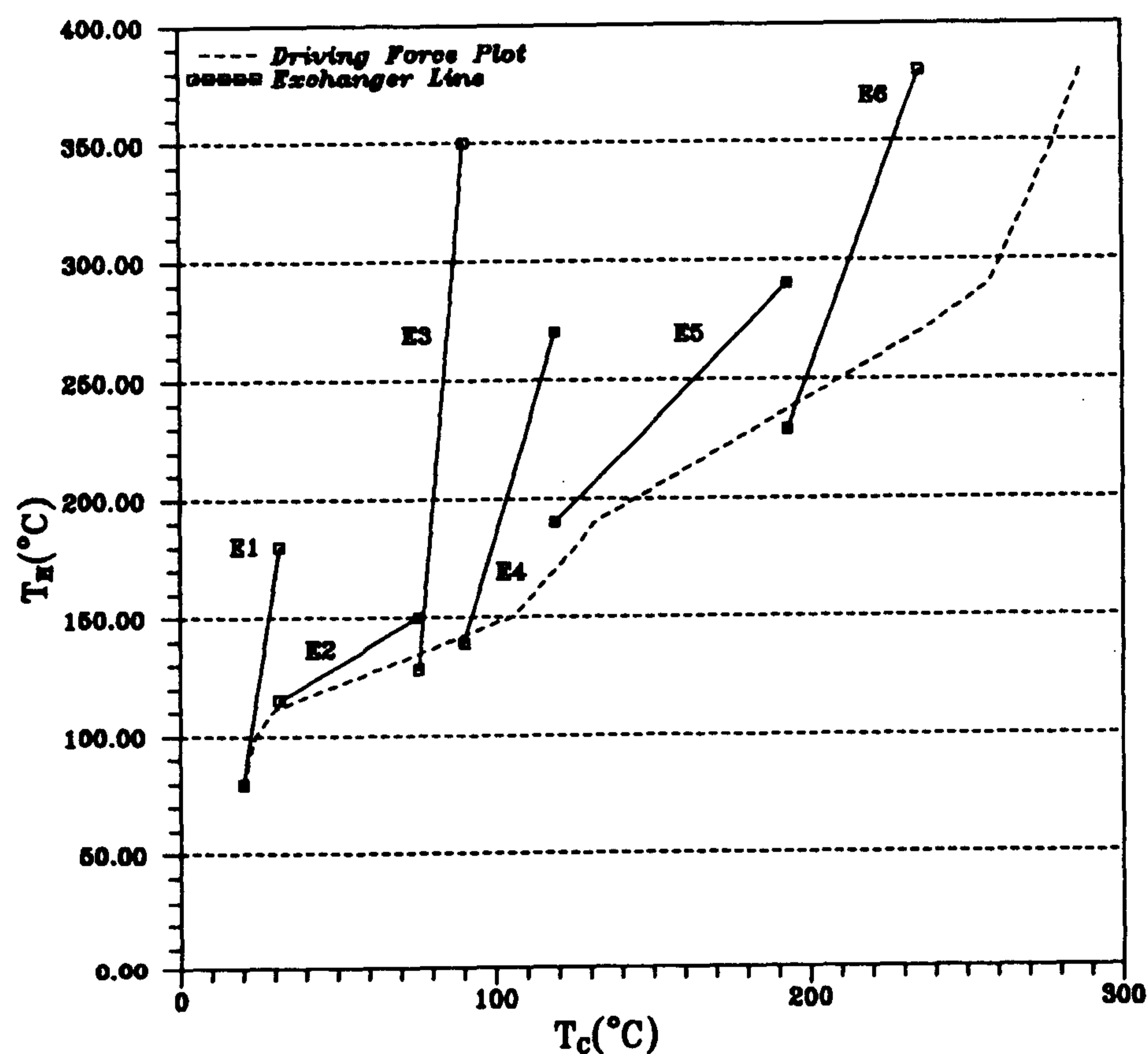
- باوجودیکه مبدل حرارتی E1 بر روی منحنی نیروی رانشی دمائی ضعیف نشان می دهد، لیکن بصورت عملی به اندازه کافی دارای بازدهی می باشد، چراکه بازدهی حرارتی آن (α_{max}, h) برابر $0/988$ و بازدهی کلی آن $(\alpha_{max}, \Delta P)$ برابر با $0/987$ است، و این نشان دهنده بهره گیری خوب مبدل مذکور از افت فشار می باشد. بنابراین مبدل E1 می تواند بدون تغییر باقی بماند.

- مبدل E2 نیز آنچنان ناکارآمد نیست و ممکن است به حالت فعلی باقی بماند. حال اگر بخواهیم دو مبدل پیاپی را ثابت نگه داریم، باید آنالیز مسئله باقیمانده را برای مجموعه E1 و E2 انجام دهیم. نتیجه نشان می دهد که نمی توان E2 را نگه داشت و حالت

فعلی بهتر است تعمیم یابد.

- مبدلهای E3 و E4 مقدار ΔT_{min} هدف گذاری شده را نقض می کنند. مقادیر (α_{max}, h) و $(\alpha_{max}, \Delta P)$ برای این واحدها نشان می دهد که واحدهای مذکور هم نسبت به نیروی رانشی دما و هم نسبت به افت فشار دارای بازدهی بالائی نیستند. بنابراین هر دو مبدل احتیاج به بهبود سازی دارند.

- مبدلهای E5 و E6 مبدلهای عبوری از پینچ هستند. بنابراین به نحو قابل توجهی نسبت به منحنی نیروی رانشی دمائی تخلف نشان می دهند. مقدار بسیار پایین بازدهی کلی (برابر با $0/253$) نشان می دهد که مبدلهای مذکور بهره گیری پائینی در استفاده صحیح از افت فشار دارند.



شکل ۹: منحنی نیروی رانشی دمائی و موقعیت مبدلها قبل از اصلاح.

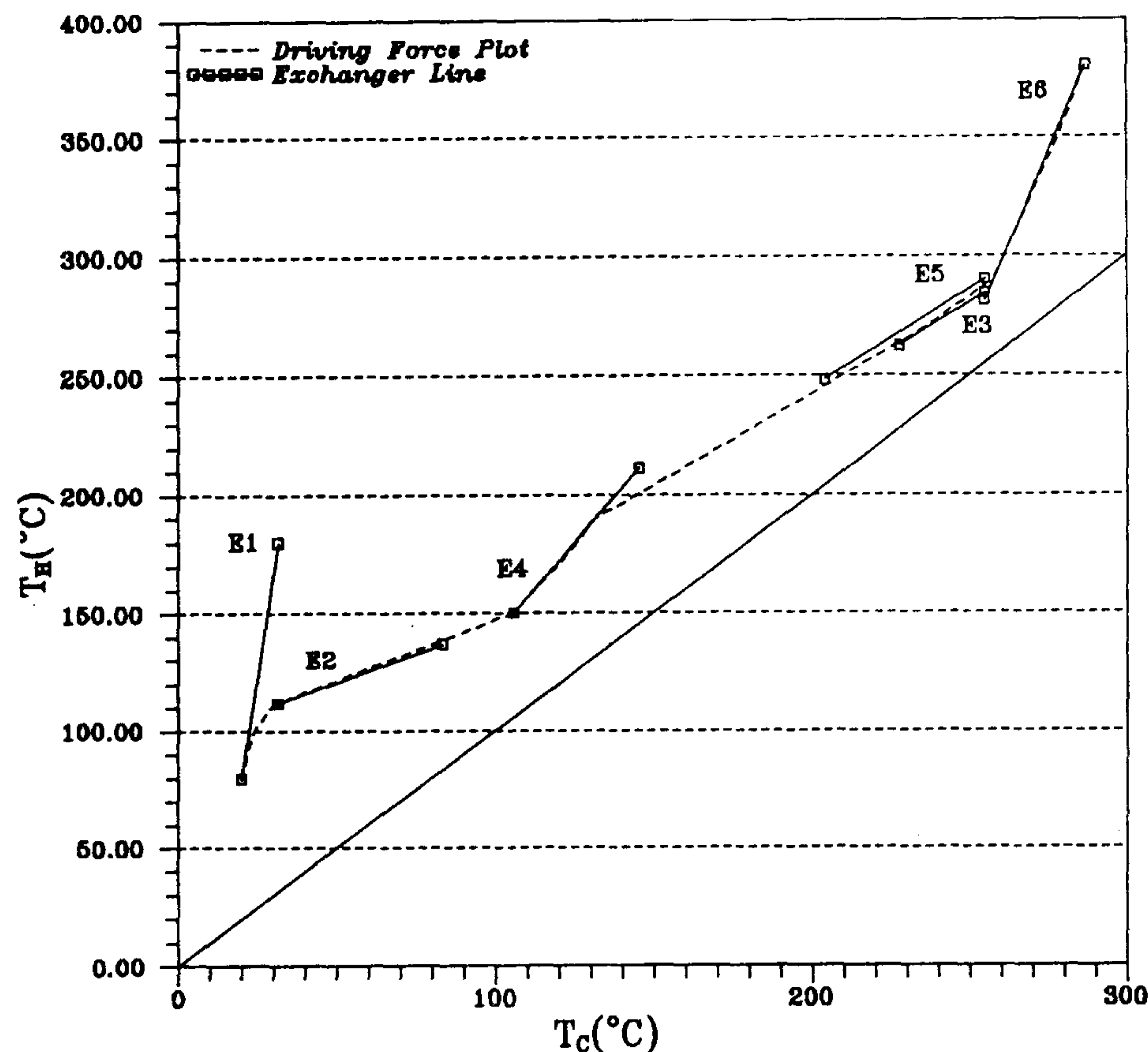
تصمیم گیری ها

آنالیز مسئله باقیمانده نشان می دهد که تنها مبدل E1 به حالت فعلی باقی می ماند و بقیه مبدلها بایستی اصلاح شوند. اما چگونه می توان این بهبود را عملی ساخت؟ برای بهبود هر دو قسمت نیروی رانشی دمائی و افت فشار، ابتدا باید تصمیمات مربوط به منحنی نیروی رانشی دمائی انجام گیرد. DFP نشان می دهد که دما باید در کدام جهت تصحیح گردد.

بررسی ابتدائی نیروی رانشی دمائی نشان می دهد

که محل مبدلهای حرارتی یاد شده می تواند با فن آوری تصحیح مکان مبدل اصلاح شود. بنابراین با داشتن تنها یک جریان سرد (جریان شماره ۷)، جریان مربوطه باید شکافته شود.

دو جریان داغ تر و سه جریان خنک تر از پینچ وجود دارند. همه این جریانها باید توسط تنها جریان سرد (که اجباراً در بالای پینچ به دو شاخه و در پایین پینچ به سه شاخه تقسیم خواهد شد) تبادل حرارت شوند. در طول اجرای این قضیه، شیب اتصالات مهمتر (یعنی مبدل E6 در بالا و



شکل ۱۰: منحنی نیروی رانشی دمائی و موقعیت مبدلها بعد از اصلاح.

نتیجه گیری

جدول (۸) نتایج کلی اصلاح شبکه مسئله نمونه از هدف گذاری تا طراحی تفصیلی است.

شبکه مبدلهای حرارتی طراحی شده به اندازه $26/839 \text{ MW}$ صرفه جوئی انرژی دارد (در مقایسه با صرفه جوئی $24/364 \text{ MW}$ از روش افت فشار ثابت [۱]) که از $33/37\%$ کاهش انرژی (در مقایسه با $30/30\%$ از روش افت فشار ثابت) برخوردار می باشد و این نشان دهنده $10/13\%$ صرفه جوئی بیشتر است. در قسمت هدف گذاری، میزان $7829/99 \text{ m}^2$ سطح اضافی پیش بینی شد، ولی در اینجا با $7/46\%$ درصد خطا مقدار $8414/36 \text{ m}^2$ سطح اضافی بکار برده شد. مقدار نسبت بازدهی سطح (α) برابر $0/818$ در شبکه اولیه به مقدار $0/878$ رسیده و سرمایه گذاری با $7/69\%$ خطا نسبت به مقدار هدف گذاری شده، به اندازه 2146412 £ بدست آمده که بطور کلی نتایج قابل قبول به نظر می آیند.

در نگاه اول خطای بین سطح اضافه لازم در مراحل هدف گذاری و طراحی بالا به نظر می رسد ولی این خطا به دلیل عدم توانائی روش بهینه سازی افت فشار در اصلاح شبکه نیست، بلکه طراحی بسیار ضعیف شبکه اولیه باعث شده است تا این اختلاف پدید آید، چون افت فشار ایدآل اکثر مبدلها بیشتر از مقدار مصرفی مبدلها در حداکثر توانائی آنها بود. در جدول (۸) دیده می شود که مقدار

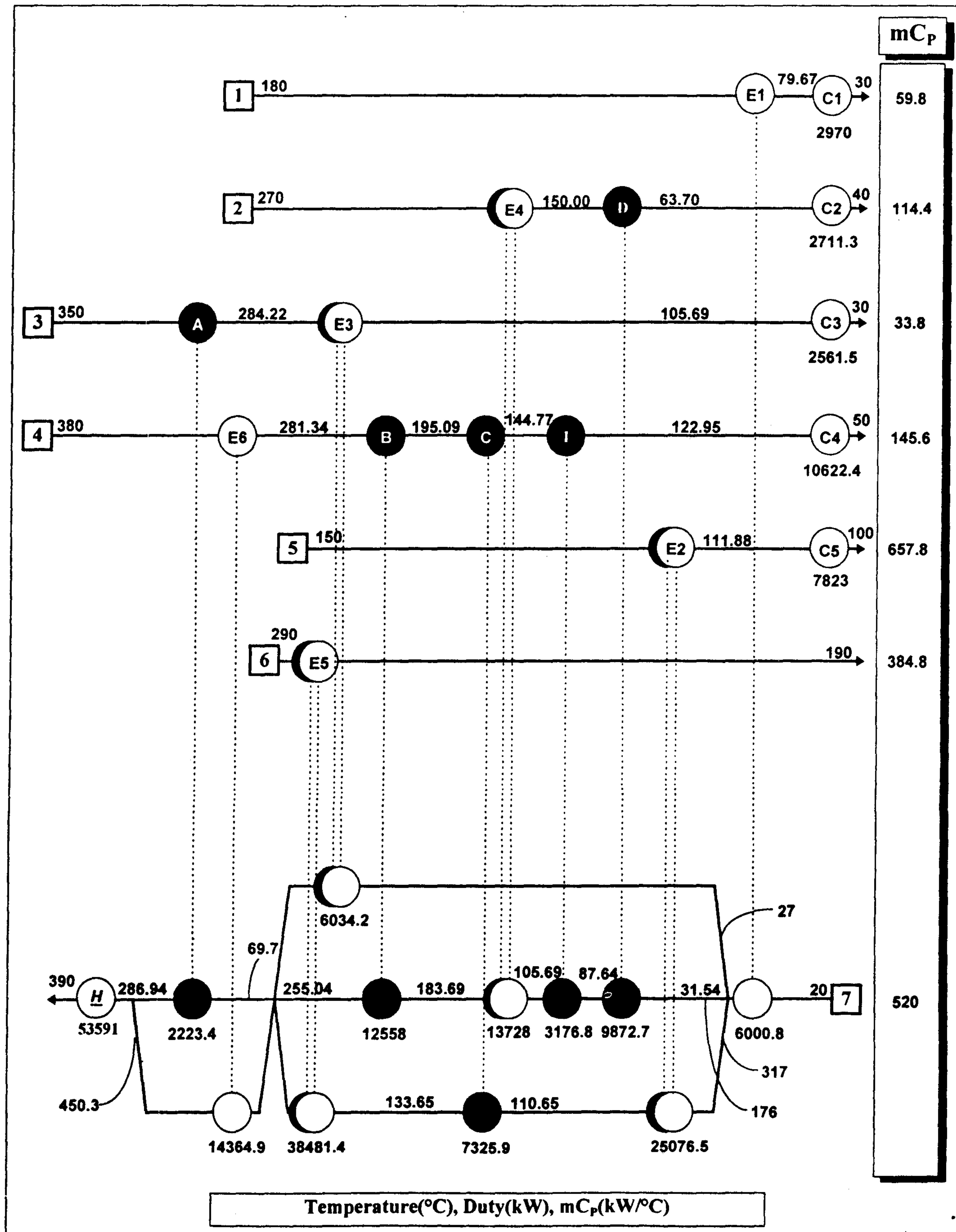
E3 و E5 در پائین پینچ) روی DFP می تواند مورد استفاده قرار گیرد و این امر با چند شاخه کردن جریان شماره ۷ صورت می گیرد. با استفاده از توضیحات داده شده و روش اصلاحی افت فشار ثابت [۷۱]، می توان مبدلهای موجود در شبکه را اصلاح نمود. شکل (۱۰) اصلاح مبدلهای موجود را بر روی منحنی نیروی رانشی دمائی نشان می دهد.

جایابی مبدلهای جدید

برای تکمیل شبکه مبدل حرارتی که شامل مبدلهای اصلاح شده و مبدلهای جدید است، شکل (۱۱) آورده شده است. حال برای طراحی تفصیلی مبدلهای جدید کفایت که افت فشار را بصورت خطی در راستای هر جریان تقسیم کنیم تا طراحی تفصیلی مبدلهای جدید بدست آید. در اینجا، شبکه اولیه را با شکستن حلقه های درونی با مبدلهای موجود هماهنگ کرده تا شبکه تکمیل گردد. شکل شماره (۱۱) شبکه مبدلهای حرارتی واحد را نشان می دهد. در این شکل، دایره های توخالی نشانگر مبدلهای اولیه، دایره های توپر نشان دهنده مبدلهای جدید، و دایره های توخالی سایه دار مبدلهای اولیه ای هستند که به آنها سطوح جدید اضافه شده است.

جوئی انرژی جمع می شود. مشکلاتی همچون مطلب یاد شده سبب می شوند تا طراحی آنچنانکه توانائی دارد، پیش نرود، ولی در هر صورت با این روش طراحی این اطمینان وجود دارد که همیشه بیشترین صرفه جوئی را در انرژی خواهیم داشت.

صرفه جوئی انرژی در مرحله طراحی بیشتر از مرحله هدف گذاری است. این پدیده به این علت است که جریان شماره ۱ علیرغم شرکت در بهینه سازی افت فشار، در مرحله طراحی نتوانست از کل افت فشار استفاده کند، در نتیجه مقدار هزینه نصب پمپ جدید از سرمایه گذاری کم شده و مقدار برق مصرفی به صرفه



شکل ۱۱: شبکه دوباره طراحی شده نهائی برای واحد پیش گرم نفت خام.

جدول ۸: مقایسه بین هدف گذاری و طراحی.

اختلاف (%)	طراحی	هدفگذاری	
+۰/۰۴	۲۶/۸۳۹	۲۶/۸۲۹	صرفه جوئی انرژی (MW)
+۷/۴۶	۸۴۱۴/۳۶	۷۸۲۹/۹۹	سطح اضافه (m ^۲)
+۳/۷۳	۰/۸۷۸	۰/۹۱۲	بازدهی کل
+۰/۲۲	۱۸۲۵۳۴۹	۱۸۲۱۳۶۱	صرفه جوئی (£/yr)
+۷/۹۶	۲۱۴۶۴۱۲	۱۹۸۸۰۸۶	سرمایه گذاری (£)
+۷/۶۸	۱/۱۷۶	۱/۰۹۲	دوره بازگشت سرمایه (yr)

فهرست علائم

α_h : نسبت بازدهی سطح یک شبکه براساس ضریب انتقال

حرارت ثابت

$\alpha_{\Delta P}$: نسبت بازدهی سطح یک شبکه براساس افت فشار ثابت

ΔP_s : افت فشار سمت پوسته، kPa

ΔP_T : افت فشار سمت لوله، kPa

ΔT_{min} : حداقل اختلاف درجه حرارت موجود بر روی منحنی های

مرکب، °C

λ : ضریب هدایت گرمائی، W/m °C

μ : ویسکوزیته، cP

ρ : دانسیته، kg/m^۳

CP : مقدار جریان جرمی - حرارتی، kW/°C

h_{io} : ضریب انتقال حرارت داخل لوله، W/m² °C

h_o : ضریب انتقال حرارت داخل پوسته، W/m² °C

h_s : ضریب انتقال حرارت داخل پوسته، W/m² °C

h_T : ضریب انتقال حرارت داخل لوله، W/m² °C

I : سرمایه گذاری، £

$R_{f,io}$: مقاومت رسوب دهی داخل لوله، m² °C/W

$R_{f,o}$: مقاومت رسوب دهی خارج لوله، m² °C/W

S : صرفه جوئی انرژی، MW

مراجع

- 1 - Panjeh Shahi, M. H. (1991). Ph.D Thesis (UMIST).
- 2 - Tjoe, T. N. (1986). Ph.D Thesis (UMIST).
- 3 - Ahmah, S., Polley, G. T. and Wardle, I. (1979). *Comp. & Chem. Engng.* Vol. 3, PP. 283-291.
- 4 - Silangwa, M. (1986). "Evaluation of various surface area efficiency criteria in heat exchanger network retrofits." M. Sc. Thesis (UMIST).
- 5 - Jegede, F. O. (1990). Ph.D Thesis (UMIST).
- 6 - Townsend, D. W. and Linnhoff, B. (1984). *ICHEME Annual Research Meeting, Bath, UK.*
- 7 - Polley, G. T., Panjeh Shahi, M. H. and Jegede, F. O. "Pressure drop consideration in the retrofit of heat exchanger networks." *ICHEME.* Vol. 68, Part A, PP. 211-220.

واژه نامه :

1 - Payback

دوره بازگشت

2 - Investment	سرمایه گذاری
3 - Process-to-Process Exchangers	مبدل‌های فرآیند به فرآیند
4 - Incremental	فزاینده
5 - Saving	صرفه جوئی
6 - Multi-Pass	چند عبوره بودن
7 - Trade-Off	تقابل
8 - Remaining Problem Analysis	تحلیل مسئله باقیمانده
9 - Driving Force Plot (DFP)	نیروی رانشی دمائی
