کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای افزایش ظرفیت یافته همراه با بهینه سازی پمپها و کمپرسورها

محمد حسن پنجه شاهی - نسیم طاهونی

دانشکدهٔ فنی - دانشگاه تهران

چکیده

امروزه تکنولوژی انتگراسیون فرایند به طور گسترده‌ای در اصلاح شبکه‌های مبدلهای حرارتی به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی و نیز رفع گلوگاه (ناشی از افزایش ظرفیت یا اصلاح فرایندهای فیزیکی و شیمیایی واحد) استفاده می‌شود. این روش یکی از موفق‌ترین روشها به منظور اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی است که تاکنون در صدها پروژه صنعتی بکار برده شده است. جدیدترین روشی که جهت رفع گلوگاه شبکه مبدلهای حرارتی بکار رفته است، بر پایه استفاده از افت فشارهای ثابت مجاز قابل تأمین) است؛ بدین ترتیب که در اصلاح شبکه نیازی به تعویض پمپ‌ها / و یا کمپرسورهای موجود نمی‌باشد. در هر حال، الگوریتم‌های موجود قابلیت بهینه کردن افت فشارها را برای جریانهای فرایند ندارند و لذا سبب بروز مشکلاتی می‌گردند. به منظور رفع این مشکلات ، در این تحقیق روش جدیدی برای رفع گلوگاه با بهره گیری از افت فشارهای بهینه جریانهای شبکه و با استفاده از تکنولوژی پینچ ارائه شده است. کاربرد این روش، امکان مطالعه تعویض پمپ‌ها/ و یا کمپرسورهای موجود در جهت بهینه کردن هزینه‌ها را مهیا می‌سازد. به بیان دیگر یک تقابل سه طرفه بین هزینه سرمایه گذاری سطوح اضافی، هزینه سرمایه گذاری پمپ‌ها و کمپرسورهای جدید و هزینه راهبری پمپ‌ها و کمپرسورها صورت می‌گیرد. در ادامه برای تحقیق در صحت روش هدفگذاری ارائه شده، واحد تقطیر یک پالایشگاه ـ که به میزان ۲۰٪ افزایش ظرفیت داده شده است ـ با این روش جدید هدفگذاری شده و سپس طراحی اصلاحی برای رسیدن به اهداف مورد نظر انجام گرفته است. نتایج نهایی طراحی تطابق بسیار خوبی با نتایج هدفگذاری داشته و این نشاندهنده قابلیت کاربرد و صحت روش ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: *فن آوری پینچ، منحنی های مرکب، طراحی اصلاحی، آنالیز اکسرژی*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و تغییر الگوی مصرف در جوامع امروزی از یک سو و حجم عظیم سرمایه‌گذاری لازم جهت احداث و راه اندازی مجتمع های بزرگی نظیر پالایشگاهها، مجتمع‌های پتروشیمی و شیمیایی، صنایع دارویی و غذایی و ... از سوی دیگر، باعث شده است تا افزایش ظرفیت واحدهای موجود به عنوان مناسب‌ترین راه حل جهت پاسخ گویی به نیاز بازار مصرف مورد توجه قرار گیرد. افزایش ظرفیت علاوه بر نیاز به انجام اصلاحاتی در راکتورها و جداسازها، باعث بروز گلوگاههایی در شبکه مبدلهای حرارتی فرایند می‌گردد. این گلوگاهها غالبا افزایش ظرفیت واحد را محدود و گاه ناممکن می‌سازند. بنابراین، واضح است که اصلاح شبکه به منظور رفع گلوگاههای ایجاد شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از انجام این پروژه، دست یافتن به روشی است که با کمک آن بتوان شبکه مبدلهای حرارتی را به منظور رفع گلوگاه با اطمینان اصلاح نمود.

تا قبل از اینکه نظریه اهمیت افت فشار مجاز جریانهای شبکه مبدل حرارتی ارائه شود، تمامی تکنیک‌های رایج که برای هدفگذاری و سنتز شبکه مبدل حرارتی بکار می رفت، با بهره گیری از ضرایب انتقال حرارت ثابت (برحسب تجربه یا با استفاده از مراجع) بود، در حالی که طراحی تفصیلی مبدلهای حرارتی عموما براساس افت فشار مجاز اجرا می‌شوند. اختلاف بین ضرایب واقعی بدست آمده پس از طراحی تفصیلی مبدلها و مقادیر فرض شده ضریب انتقال حرارت سبب بروز دو مشکل زیر می‌گردد:

۱- ناهماهنگی بین طراحی تفصیلی و سنتز شبکه در ارتباط با سطح مبدلهای حرارتی.

۲- ناصحیح بودن تقابل انرژی ـ سرمایه و بهینه‌سازی شبکه.

جدیدترین روشی که برای هدفگذاری و سنتز شبکه رایج می‌باشد، روش بکارگیری افت فشار به عنوان یک متغیر فیزیکی ، قابل حس و ثابت برای شبکه‌های مبدل حرارتی است. به خوبی نشان داده شده که فرض ثابت بودن افت فشار مجاز جریانهای یک شبکه توانائی در نظر گرفتن امکان تغییر افت فشارهای مجاز به جهت احتمال یک طراحی بهتر را نداشته و سبب بروز مشکلات زیر می‌شود:

۱ـ ممکن است سرمایه‌گذاری لازم برای سطوح جدید بهینه نباشد.

۲ـ ممکن است هزینه عملیاتی بهینه نباشد.

۳ـ بهینه نبودن نتایج هدفگذاری، شروع غلطی برای طراحی خواهد بود که شبکه نامناسبی را نتیجه خواهد داد.

بنابراین علاوه بر درنظر گرفتن اثر افت فشار به جای ضریب فیلمی انتقال حرارت، باید تصمیماتی نیز جهت بهینه سازی این پارامتر تعیین کننده اتخاذ نمود تا علاوه بر شرایط اقتصادی دستگاههای عمل کننده انتقال حرارت (همچون مبدل حرارتی)، شرایط اقتصادی و تجهیزات رانشی سیال موجود در شبکه نیز مدنظر قرار گیرد.

توضیح بیشتر آن که با استفاده از روش افت فشار ثابت، به هیچ عنوان قیمت پمپ‌های مورد استفاده در واحد درنظر گرفته نمی‌شود و این سوال به ارزش خود باقی است که آیا می‌توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

پمپ‌های قوی تری در جهت نصب مبدلهای با افت فشار مجاز بالاتر بکار برد تا هزینه کل واحد بهبود یابد و یا اینکه اگر پمپ‌های ضعیف‌تری انتخاب شوند و در عوض سطح مبدلهای حرارتی افزایش یابد. آیا کاهش مصرف برق پمپ‌ها و کمپرسورها می‌تواند این افزایش هزینه ها را جبران کند؟

۱ـ تئوری جدید هدفگذاری همراه با بهینه‌سازی افت فشار

هنگامی که شبکه مبدلهای حرارتی یک واحد به منظور کاهش مصرف انرژی اصلاح می‌شود، عمدتاً دو عامل اقتصادی سقف سرمایه گذاری و زمان بازگشت سرمایه ملاک تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند. اما در پروژه‌های رفع گلوگاه، میزان کاهش مصرف انرژی ثابت است و بنابراین برآورد زمان بازگشت سرمایه در این پروژه‌ها مفهومی ندارد.

۱ـ۱ـ تعریف تابع هدف جدید

واضح است که در روش بهینه سازی افت فشار، افت فشار جریانهای موجود در شبکه باید فراتر از حد رعایت آنها مورد توجه قرار گرفته و طبق مشخصات واحد بطور لازم بهینه شوند. هر چقدر افت فشارمجاز یک جریان بیشتر باشد، آشفتگی جریان نیز بیشتر شده و در نتیجه ضریب انتقال حرارت لایه‌ای زیاد می‌گردد. با افزایش مقدار ضریب انتقال حرارت، سطح هر مبدل حرارتی نصب شده بر روی جریان مورد نظر، کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش هزینه سرمایه‌گذاری خرید مبدلهای لازم برای شبکه می‌شود. اما از طرف دیگر با ازدیاد افت فشار مجاز جریان موجود در شبکه، هزینه تأمین این افت فشار که عبارت از خرید پمپ و یا کمپرسور و همچنین مقدار برق مصرفی این تجهیزات می‌باشد، افزایش می‌یابد. بنابراین یک تقابل بین انرژی سرمایه سطح شبکه و سرمایه افت فشار شبکه بوجود می‌آید.

هدف از انجام این طرح، بهینه سازی افت فشار در جهت بهبود تابع هدف جدید تعریف شده برای اصلاح گلوگاههای یک شبکه افزایش ظرفیت یافته است. تفاوت عمده در تابع هدف روش اصلاحی رفع گلوگاه و روش اصلاحی صرفه‌جویی در مصرف انرژی در آنست که تابع جدید، تابعیتی از متغیر ΔT_{min} ندارد. چراکه میزان بازیافت انرژی در اینگونه پروژه‌ها ثابت است و درنتیجه ΔT_{min} مربوط به آن نقطه نیز مشخص می‌باشد. متغیرهای این تابع، تعدادی متغیر مستقل، به تعداد جریانهای موجود در شبکه‌اند که از قاعده افت فشار مجاز پیروی می‌کنند. این متغیرها در طول عملیات بهینه سازی می‌باید تغییر کنند تا تابع هدف اصلی بهینه گردد. تابع هدف مذکور را می‌توان به شکل زیر تعریف کرد:

$$\text{TotalCost} = f(\Delta P_1, \Delta P_2, ..., \Delta P_n) \quad (۱)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

$= CC(\Delta A) + CC(P) + NPV(\Delta P)$

$= \text{Additional Area} + \text{New Pumps / Comp.}$

$+ \text{Pumps / Comp. Running Cost}$

$CC: \text{Capital Cost}$

$NPV: \text{Net Present Value}$

$CC(\Delta A)$ در واقع همان سرمایه‌گذاری سطوح مبدلهای حرارتی (Area Investment) است که هزینه ناشی از سرمایه‌گذاری برای سطوح اضافی نصب شده بر روی شبکه می‌باشد. $CC(P)$، همان سرمایه‌گذاری پمپ است که مجموع هزینه سرمایه‌گذاری برای خرید پمپ‌های جدید را نشان می‌دهد. $NPV(\Delta P)$ نیز هزینه راهبری (Power Consumption) تمامی پمپ‌ها (نه فقط پمپ‌های جدید) می باشد. این هزینه(هزینه راهبری)، بطور کلی و نه به شکل سالیانه با دو هزینه ذکر شده قبلی جمع می‌شود و تابع هدف مذکور (Generalized Investment) را تشکیل می‌دهد.

بنابراین در هر دو حالت زیر یعنی:

الف) هنگامی که از پمپ‌های قوی‌تر استفاده می‌کنیم،

ب) هنگامی که پمپ‌های موجود را با پمپ‌های ضعیف تر تعویض می‌نمائیم،

تابع هدف ما که عبارت از جمع جبری$CC(P)$ ، $CC(\Delta A)$ و $NPV(\Delta P)$ است، باید بزرگترین عدد منفی و یا به عبارت دیگر کمینه شود؛ تا افت فشارهای بهینه جریانها بدست آیند.

هزینه سرمایه گذاری سطوح مبدل از یک سو و هزینه سرمایه گذاری و راهبری پمپ‌های جدید از سوی دیگر صورت گیرد:

$$[CC(P) + NPV(\Delta P)] \Leftrightarrow CC(\Delta A) \qquad (۲)$$

و اما در حالت (ب) این تقابل دو طرفه به شکل زیر است:

$$[CC(P) + CC(\Delta A)] \Leftrightarrow NPV(\Delta P) \qquad (۳)$$

قابل ذکر است که در روش بهینه سازی، بدون محاسبه گرادیان تابع هدف نسبت به هریک از متغیرهای مستقل، و تنها با کمک روشهای جستجوی مستقیم ریاضی (مثل روش نسبت طلایی و روش نلدر ـ مید) مقدار کمینه تابع هدف را در نقاط بهینه متغیرهای مستقل بدست می‌آوریم.

۱ـ۲ـ تعیین نوع مسیر اصلاحی در روش ارائه شده

در این بخش راهبری جدیدی برای هدفگذاری در پروژه‌های رفع گلوگاه پیشنهاد شده است.

۱ـ۲ـ۱ـ شبیه سازی افزایش ظرفیت در شبکه مبدلهای حرارتی

در این مرحله عملکرد پمپ‌ها / کمپرسورها و مبدلهای موجود در شبکه تحت شرایط جدید دبی، دما و فشار پس از افزایش ظرفیت شبیه سازی می‌شوند تا عملکرد هریک به طور دقیق ارزیابی شود. بدین ترتیب میزان انرژی اضافی مورد نیاز برای دستیابی جریانهای سرد به دمای نهایی مورد نظر معین می‌گردد.

۱ـ۲ـ۲ـ تعیین راندمان در نقطه موجود شبکه با دبی افزایش یافته

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

در این مرحله به کمک اطلاعات جریان پس از افزایش ظرفیت و با توجه به افت فشارهای مورد نیاز که در شبیه سازی مبدلها تحت دبی‌های افزایش یافته حاصل شده است، راندمان شبکه موجود پس از افزایش ظرفیت را تعیین می‌کنیم.

۱ـ۲ـ۳ـ تعیین سطح فرضی شبکه موجود جهت هدفگذاری برای شبکه افزایش ظرفیت یافته با توجه به محدودیت‌های افت فشار

حال با درنظر گرفتن یک سطح فرضی برای شبکه‌ای که دارای میزان ثابتی ازمصرف انرژی بوده و افت فشارهای قابل دسترسی آن کاهش پیدا کرده است، میزان اضافه سطح برای غلبه بر محدودیت‌های افت فشار تعیین می‌گردد. این عمل بدین مفهوم است که راندمان شبکه در نقطه موجود (بعد از افزایش ظرفیت) در هر دو حالت توجه و یا عدم توجه به محدودیت‌های افت فشار یکسان در نظر گرفته شده و سطح فرضی محاسبه می‌شود.

۱ـ۲ـ۴ـ تعیین نقطه هدفگذاری بهینه

طی مراحل قبل میزان راندمان شبکه در نقطه موجود، مقادیر افت فشار مجاز جریانها و نیز سطح فرضی مورد نیاز برای غلبه بر محدودیت‌های افت فشار مشخص شدند. حال به کمک این اطلاعات و بدون نیاز به رسم منحنی ایده آل سطح ـ انرژی و نیز منحنی هدفگذاری، مکان نقطه هدفگذاری شده به ترتیب زیر مشخص خواهد شد:

برای تعیین مکان نقطه هدفگذاری شده نیاز به رسم منحنی ایده‌آل سطح ـ انرژی به کمک افت فشارهای بهینه نیست. تنها کافی است در ΔT_{min} متناظر با حداکثر بار مجاز کوره، افت فشار جریانها بهینه شوند . این نقطه که حاصل مرحله هدفگذاری است، اطلاعات زیر را در اختیار خواهد گذاشت:

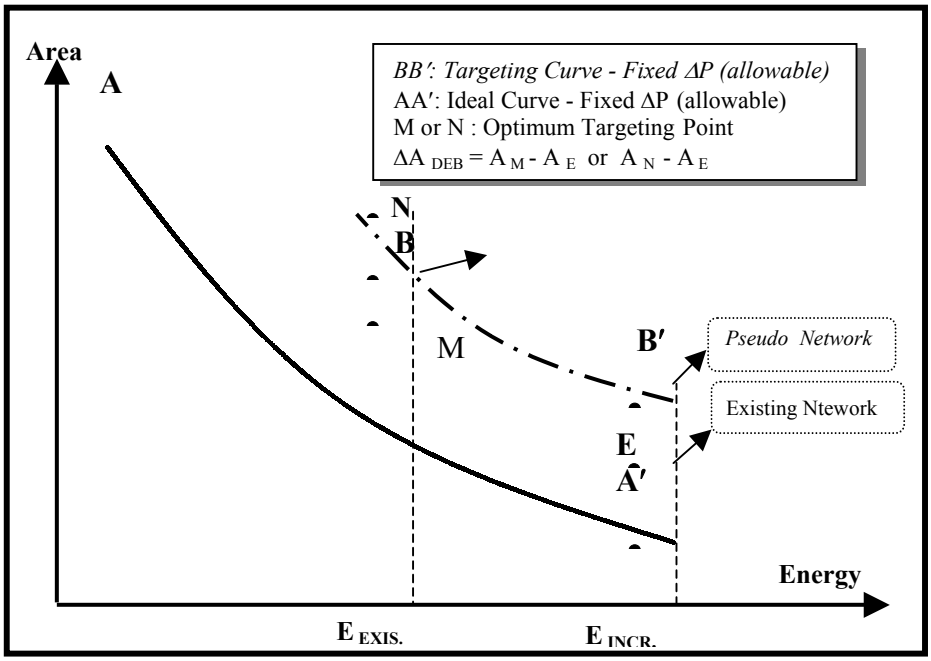
۱ـ افت فشارهای بهینه جریانها که به نوبه خود توان پمپ‌ها و کمپرسورها را نشان می‌دهد.
۲ـ سطح تبادل حرارتی اضافی جهت اصلاح شبکه.
۳ـ ضرایب انتقال حرارت در شبکه جدیدی که طراحی خواهد شد.
٤ ـ اطلاعات اقتصادی نظیر هزینه سرمایه گذاری سطوح مبدلها، پمپ‌های جدید، برق مصرفی آنها و ...

۱ـ۲ـ۵ـ برآورد سطح اضافی مورد نیاز

اکنون با استفاده از سطح تعیین شده توسط منحنی هدفگذاری (توجه شود که این منحنی در طول مسیر رسم می‌شود.) بر روی خطی که دارای مصرف مجاز انرژی در کوره باشد، میزان سطح مورد نیاز برای اصلاح شبکه جهت رفع گلوگاه (با در نظر گرفتن امکان تعویض پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود) تعیین می‌شود. این میزان سطح اضافی مورد نیاز، در حقیقت تفاوت میزان سطح برآورد شده و سطح موجود در شبکه است. باتوجه به شکل (۱-۱) می‌توان نوشت:

$$\Delta A_{DEB} = A_M - A_E \quad \text{or} \quad \Delta A_{DEB} = A_N - A_E \qquad (٤)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]



شکل ۱ـ برآورد سطح اضافی مورد نیاز بر مبنای بهینه‌سازی افت فشار

۱ـ۲ـ۶ـ برآورد سرمایه گذاری

در این مرحله می‌توان برآورد سرمایه گذاری لازم جهت اصلاح شبکه را انجام داد. اگر نقطه هدفگذاری شده دقیقاً بر روی نقطه B (شکل ۱) بیفتد، در این نقطه:

- هیچ هزینه سرمایه‌ای برای پمپ‌ها لازم نیست.
- هیچ هزینه برق اضافی برای پمپ‌ها لازم نیست.
- تمام ΔA لازم براساس روش افت فشار ثابت باید خریداری و نصب شود.

چنانچه نقطه هدفگذاری شده زیر نقطه B، به طور مثال در مکان نقطه M قرار گیرد.

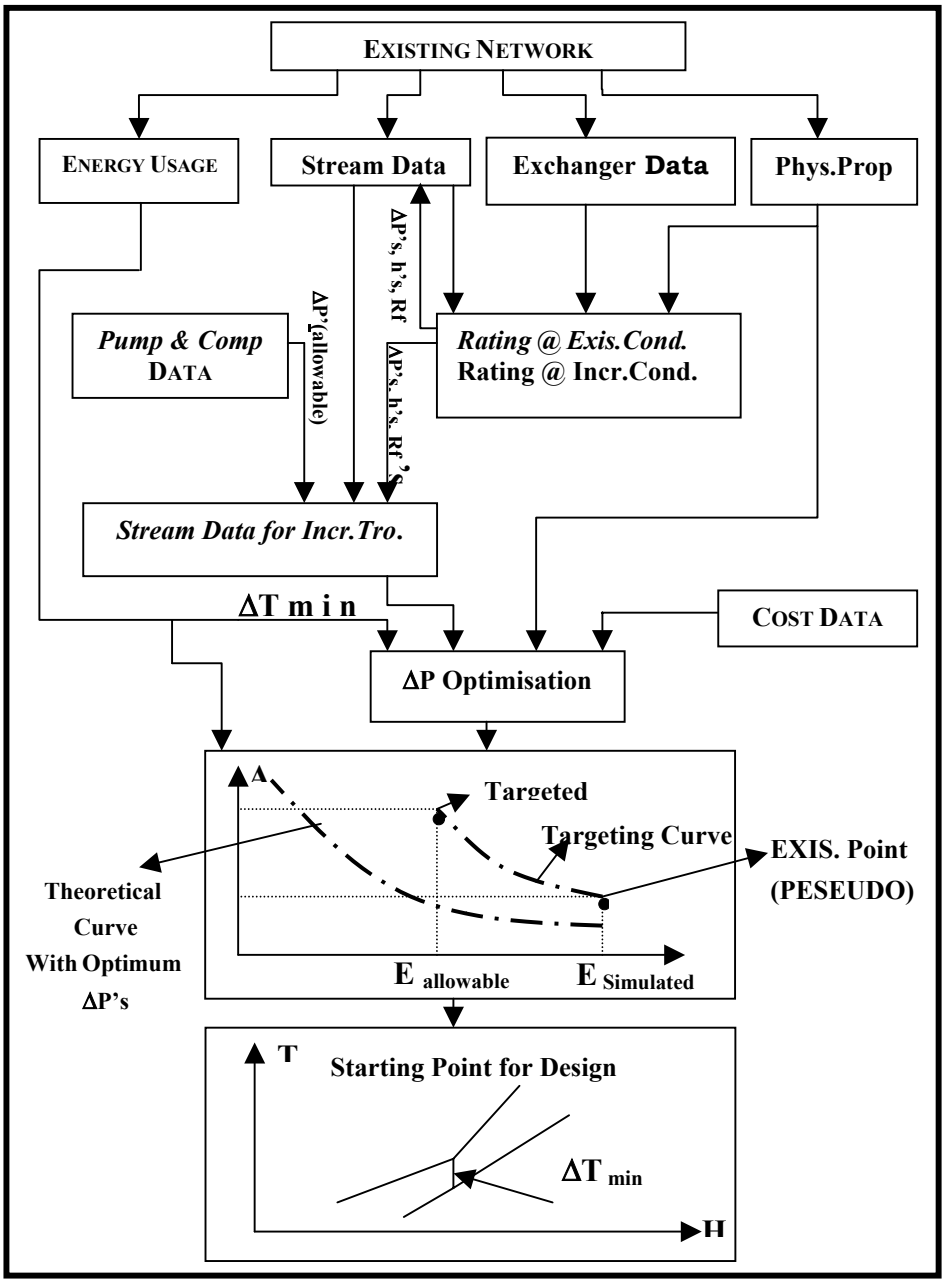
- هزینه اضافی سرمایه‌ای برای خرید پمپ‌های جدید لازم است.
- هزینه قابل توجهی برای برق اضافی لازم است.
- ΔA کمتر شده و نیاز به سرمایه‌گذاری کمتری برای سطح است.

چنانچه نقطه هدفگذاری شده در مکان نقطه‌ای مانند N قرار گیرد، بدین معنی است که پمپ‌های مورد استفاده ضعیف تر شده‌اند؛ در این حالت:

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

- هزینه اضافی سرمایه‌ای برای خرید پمپ‌های جدید لازم است.
- در هزینه برق صرفه‌جویی خواهیم داشت.
- ΔA بیشتر شده و نیاز به سرمایه گذاری بیشتری برای سطوح جدید است.

خلاصه ای از مراحل الگوریتم جدید ارائه شده در شکل (۲) نشان داده شده است.



[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

شکل ۲ـ خلاصه‌ای از روش جدید هدفگذاری شبکه برای اصلاح شبکه افزایش ظرفیت یافته

۲ـ کاربرد روش جدید در یک مسئله نمونه

از آنجا که یکی از مهمترین کاربردهای روش ارائه شده، اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی جهت افزایش ظرفیت پالایشگاهها است، روش مورد نظر را برای افزایش ظرفیت واحد تقطیر یک پالایشگاه ساده بکار می‌بریم. دیاگرام ساده شده واحد در شکل (۳) نمایش داده شده است. همچنین شبکه مبدلهای حرارتی نمودار جریانی شکل (۳) بعد از افزایش ظرفیت، به صورت یک شبکه ساده در شکل (٤) رسم شده است.

جدول (۱) مشخصات مبدلهای موجود واحد پیش گرم نفت خام

	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Shell side	Kero.	Naph.	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 (۲) دبی و خواص فیزیکی جریانهای واحد پیش گرم نفت خام

St. No.	Στρεαμ Name	Flow (Kg/s)	P (Kg/m^3)	C_P (J/Kg^oC)	μ (cP)	K (W/m^oC)
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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

5	Naphta	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 (۳) اطلاعات عمومی و اطلاعات اقتصادی

Hot Utility Cost (€/KW.yr) : 70 *Cold Utility Cost (£/KW.yr) : 7* *Power Cost (£/KW.yr) : 60*	Plant Life Time (yr) : 20 Interest Rate (%) : 15 Max Area per Shell : 580 *Number of Tube Passes : 2* *X-Factor for Multiple Pass Shells: 0.8*
Exchanger Capital Cost : 8600 + 670 (Area) $^{0.83}$ *Pump Capital Cost : 8600 + 7310 (q √H)*$^{0.2}$ *Pump Efficiency (%) : 70* *Compressor Capital Cost : 8600 + 83.66 (W)* $^{0.62}$ *Compressor Efficiency (%) : 70* Annualization Factor : $i(i+1)^N / \{(i+1)^N - 1\}$	

جدول (۴) نتایج حاصل از تحلیل مبدلها پس از افزایش ظرفیت

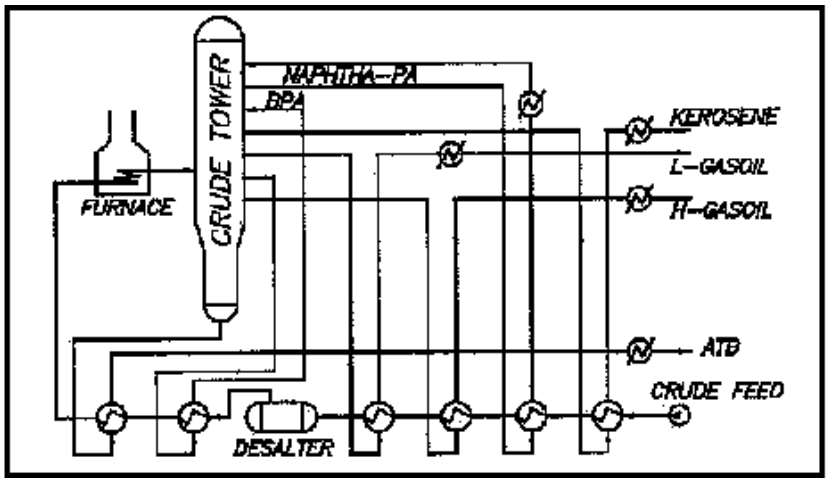
	E1	E2	E3	E4	E5	E6
h_i (W/m^2 °C)	2252.956	1039.007	2252.956	1646.033	852.294	1646.033
h_o (W/m^2 °C)	1931.884	2756.495	1318.001	1685.94	1788.888	1603.839
ΔP_t (K Pa)	45.589	16.051	45.589	43.420	14.964	73.816
ΔP_s (K Pa)	67.591	94.372	44.624	86.868	108.177	123.052
$R_{f,i}$ (m^2 °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142
$R_{f,o}$ (m^2 °C/W)	.00144	.00137	.00140	.00142	.00157	.00142

جدول (۵) اطلاعات جریانهای واحد پس از افزایش ظرفیت

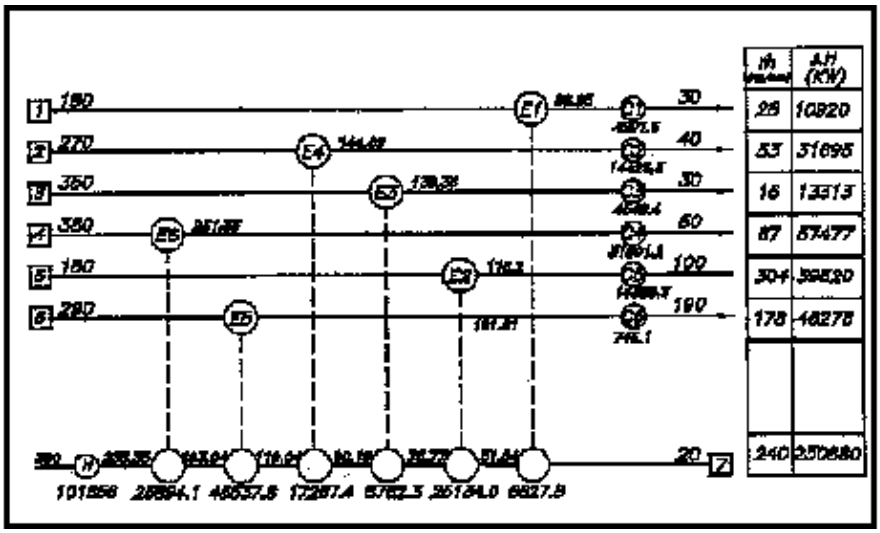
St. No.	Supply Temp. (°C)	Target Temp. (°C)	C_P (KW/ °C)	HTC (W/m^2 °C)	ΔP (K Pa)
1	180.0	30.0	72.8	510.822	67.591
2	270.0	40.0	137.8	496.736	86.868
3	350.0	30.0	41.6	463.236	44.624
4	380.0	50.0	174.2	489.356	123.052
5	150.0	100.0	790.4	577.107	94.372

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

6	290.0	190.0	462.8	469.703	108.177
7	20.0	390.0	624	372.9	239.429



شکل (۳) نمودار جریانی واحد پیش گرم نفت خام



[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

شکل (۴) شبکه مبدلهای حرارتی واحد پیش گرم نفت خام پس از افزایش ظرفیت

۲ـ۱ـ هدفگذاری

اکنون زمان آن رسیده است که باتوجه به محدودیت‌های موجود در شبکه، سطح مورد نیاز جهت رفع گلوگاهها را برآورد نمود و پس از آن هزینه‌های مترتب بر آن را پیش بینی کرد. توجه شود که نتایج جدول (٦) از برنامه Pilot استخراج شده است.

جدول (۶) نتایج هدفگذاری برای تعیین میزان سطح مورد نیاز به منظور رفع گلوگاهها

Debottlenecking Point Target			
Min . Temp . Diff .	58.00 ° C	Minimum 1-2Area	10983.89 M^2
Cold Utility	48751.79 KW	Target Area	12313.25 M^2
Hot Utility	80419.79 KW	Existing Area	6960.00 M^2
Pseud . Hot Ut .	101656.00 KW	Additional Area	5353.25 M^2
Hot Ut . Enhan .	21236.21 KW	Constant Alpha	.892
Power Consum .	26554. £/Yr	Area Investment	1374618. £
Energy Saving	1635188. £/Yr	Flow Investment	0. £
	Generalized Investment	1226065 . £	

Stream	Rout	Velocity	H.T.C	Pres.Drop	Cont.Area	ID/Phase
H 1	S	.691	513.36	67295.8	256.38	P(L)
H 2	S	.764	514.34	244815.5	1307.01	P(L)
H 3	S	.592	489.58	207721.7	625.86	P(L)
H 4	S	.726	505.16	409157.4	2804.84	P(L)
H 5	S	.866	562.79	49675.9	1291.39	P(L)
H 6	S	.683	473.99	153234.0	3347.84	P(L)
H 7	S	.019	1000.00	.0	.28	C(L)
C 1	T	2.158	393.78	624152.9	9633.46	P(L)
C 2	T	.086	1000.00	.0	.14	C(L)

[√] PSEUDO EXISTING NETWORK WAS FOUND AT DTMIN = 92.035 ° C

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

جدول (۷) ضرایب انتقال حـــرارت و افـــت فشـــارهای بهیـــنه شده جریانهای مختلف در
$\Delta T_{min} = ۵۸\ °c$

$\alpha_{tar} = 0.892$					
St. No.	**Stream Name**	**Exchanger Side**	**Targeted-h ($W/m^2\ °C$)**	**Opt.Pressure Drop (Pa)**	**Contact Area (m^2)**
1	Kerosene		513.36	67295.8	256.38
2	LGO	Shell	514.34	244815.5	1307.01
2	HGO		489.58	207721.7	625.86
4	ATB	Shell	505.16	409157.4	2804.84
5	Naphtha	Shell	562.79	49675.9	1291.39
6	BPA	Shell	473.99	153234.0	3347.84
7	Crude	Tube	393.78	624152.9	9633.46

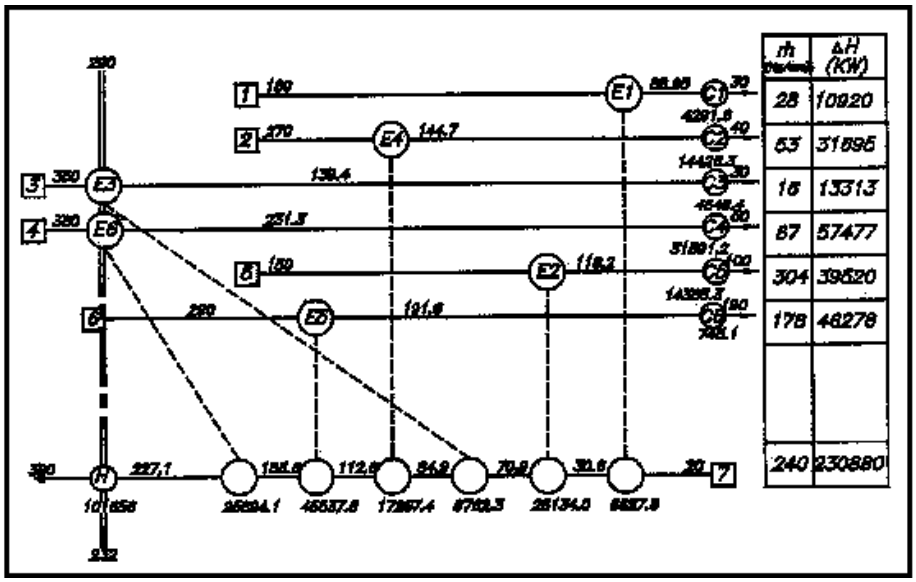
۲ـ۲ـ طراحی

در این مرحله با تبعیت از اصول تکنولوژی پینچ و با بکارگیری ابزار این تکنولوژی، سعی می‌کنیم تاشبکه موجود را به سمت اهداف هدفگذاری شده (قسمت ۲-۱)، سوق دهیم.

۲ـ۲ـ۱ـ آنالیز مبدلهای موجود

نکته مهمی که هنگام اصلاح شبکه باید به آن توجه نمود این است که حتی الامکان باید سعی شود تا مبدلهایی که در محل مناسب قرار گرفته‌اند، بدین معنی که راندمان خوبی دارند، دست نخورده باقی بمانند. برای انجام این کار، آنالیز مبدل از پینچ حرارت عبور داده، رسم نیروی رانشی دمائی و آنالیز باقیمانده مسئله می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

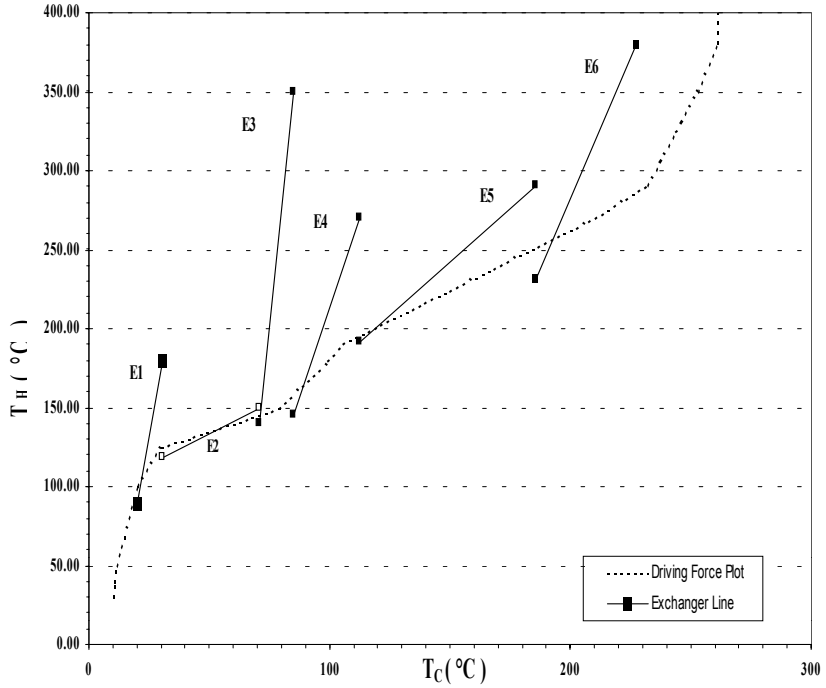


شکل (۵) مبدلهایی که پینچ را قطع کرده‌اند (ΔT_{min}= ۵۸ °c)

جدول (۸) محاسبه میزان حرارت عبوری از نقطه پینچ

Unit	Calculation	Heat (MW)
E3	(350-290) * 41.6 * 10^{-3}	2.496
E6	(380-290) * 174.2 * 10^{-3}	15.678
Furnace (H)	(232-227.09) * 624 * 10^{-3}	3.064
Total		21.238

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]



شکل ۶ـ منحنی نیروی رانش دمایی در ΔT_{min}= ۵۸ °c همراه با خطوط عملکرد مبدلهای موجود

جدول (۹) آنالیز باقیمانده مسئله

$\Delta T_{min,tar}$ = 58 ° C $Q_{H,tar}$ = 80418 KW		Constant Coefficient $A_{1\text{-}1,min,tar}$ = 9145.88 m ^{2} Const$\alpha_{h,max}$ = 0.877			Fixed Pressure Drop $A_{1\text{-}2,min,tar}$ = 9634.16 m ^{2} Const.$\alpha_{p,max}$ = 0.892		
Exch. Name	**Rem. ΔT_{min}**	**Exis $A_{1\text{-}1}$**	**Rem $A_{1\text{-}1,min}$**	**α_{max} (h)**	**Exis $A_{1\text{-}2}$**	**Rem $A_{1\text{-}2,min}$**	**α_{max} (Δp)**
E1	58	285.87	8925.21	0.993	280	9438.45	0.991
E2	58	1302.66	7851.07	0.999	1480	- - - -	- - - -
E3	54	276.36	9415.89	0.944	280	10052.23	0.932
E4	51.85	767.69	8664.53	0.970	800	9549.23	0.931
E5	14.72	2323.73	8603.93	0.837	2760	9251.59	0.802
E6	29.04	1318.38	9008.19	0.886	1360	42326.19	0.221

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

۲ـ۲ـ۲ـ اصلاح مبدلهای با راندمان پایین

آنالیز باقیمانده مسئله پس از اصلاح عملکرد مبدلهای موجود در شبکه در جدول (۱۰) ارائه شده است. نیز در شکل (۷) شبکه اصلاح شده نشان داده شده است.

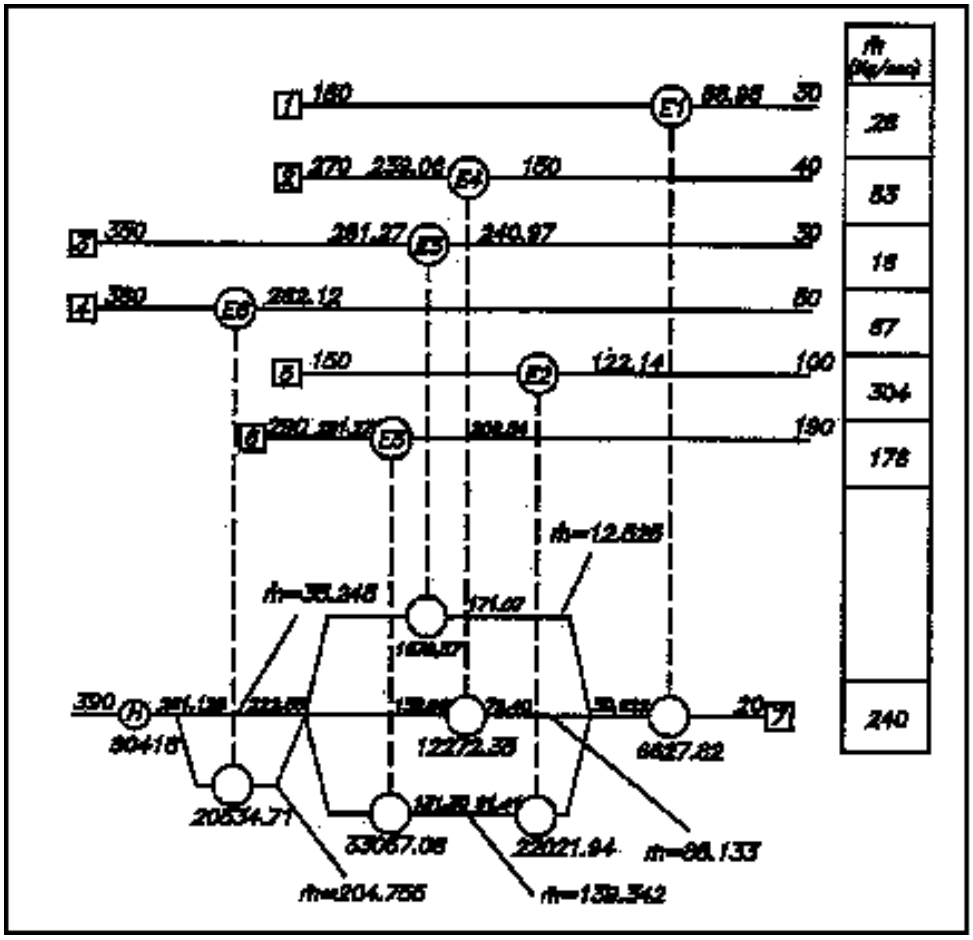
جدول (۱۰) آنالیز باقیمانده مسئله پس از اصلاح عملکرد مبدلهای موجود

$\Delta T_{min,tar} = 58\ ^\circ C$ $Q_{H,tar} = 80418\ KW$		Constant Coefficient $A_{1\text{-}1,min,tar} = 9145.88\ m^2$			Fixed Pressure Drop $A_{1\text{-}2,min,tar} = 9634.16\ m^2$		
Exch. Name	Rem. ΔT_{min}	Exis $A_{1\text{-}1}$	Rem $A_{1\text{-}1,min}$	α_{max} (h)	Exis $A_{1\text{-}2}$	Rem $A_{1\text{-}2,min}$	α_{max} (Δp)
E6	56.113	1287.19	7882.27	0.997	1360	8183.43	1.000
E6+E1	56.113	1573.06	7660.92	0.990	1640	7983.96	1.000
E6+E1+E5	56.113	3828.21	5408.45	0.990	4400	5476.54	0.975
E6+E1+E5+E3	56.113	3947.97	5289.38	0.990	4680	5348.04	0.961
E6+E1+E5+E3+E2	56.113	5235.35	4009.05	0.989	6160	4039.84	0.945
E6+E1+E5+E3+E2+E4	56.113	5866.75	3411.73	0.986	6960	3279.47	0.941

۲ـ۲ـ۳ـ تکمیل شبکه نهایی

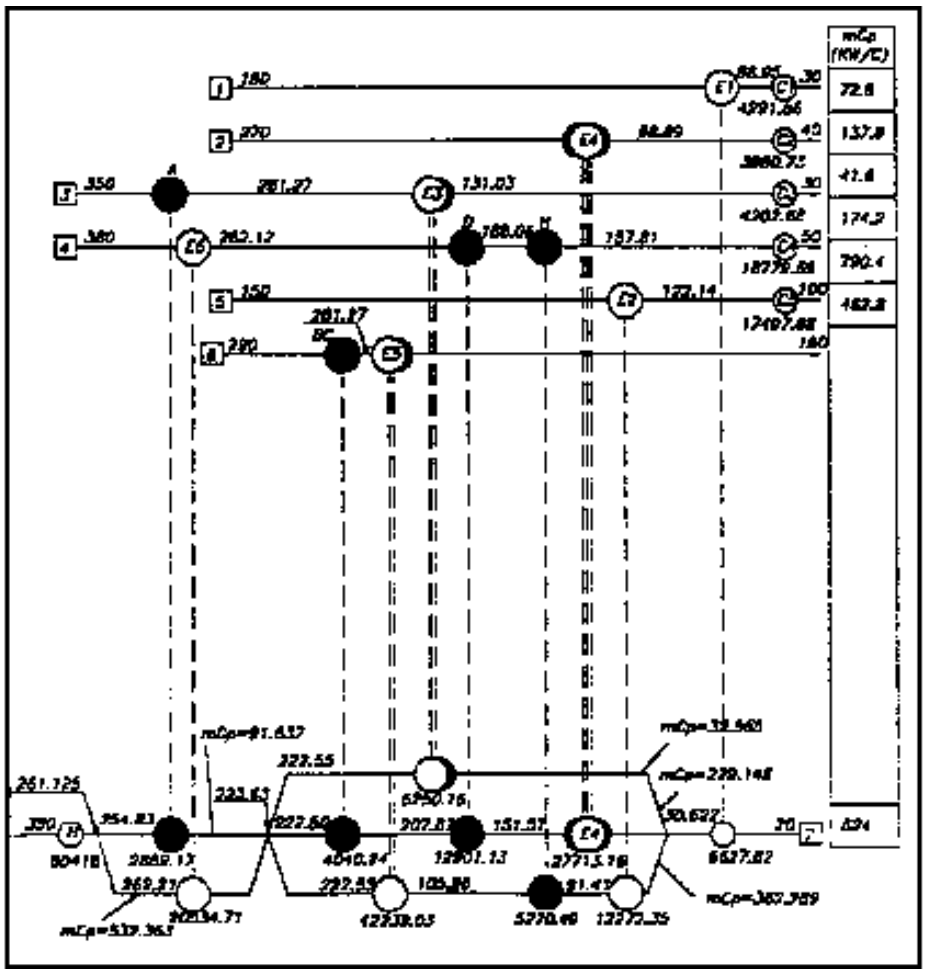
شبکه تکمیل شده نهایی (شکل ۸)، شامل ۱۰ واحد می‌باشد که از این تعداد چهار واحد، مبدلهای جدید و شش واحد دیگر همان مبدلهای اولیه هستند که تعداد پوسته‌ها و بار آنها افزایش یافته است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]



شکل ۷ـ شبکه پس از اصلاح عملکرد مبدلهای موجود

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]



شکل ۸ـ شبکه تکمیل شده نهایی برای واحد پیش‌گرم نفت‌خام

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

۳ـ بحث و نتیجه گیری

جدول (۱۱) نتایج طراحی و مقادیر هدفگذاری را در شبکه مبدل حرارتی موجود با یکدیگر مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که روش پیشنهاد شده برای هدفگذاری به منظور رفع گلوگاه به کمک افت فشارهای بهینه، با دقت بسیار بالایی قادر به پیش بینی میزان سطح اضافی مورد نیاز گردیده است. نیز برآوردهای اقتصادی انجام شده در مرحله هدفگذاری، به بهترین صورت ممکن در مرحله طراحی تأیید شده است

جدول (۱۱) مقایسه نتایج طراحی و هدفگذاری

	Targeting	***Design***	**Difference**
Energy saving (MW)	*21.238*	*21.238*	*0.0 %*
Area requirment (m^2)	*3840.63*	*3818.75*	*- 0.6 %*
Overall efficiency	*0.892*	*0.894*	*+ 0.2 %*
Power Consumption (£/Yr)	*26554.*	*26554.*	*0.0 %*
Area Investment (£)	*969653.*	*965392.*	*- 0.4 %*
Flow Investment (£)	*90459.*	*90459.*	*0/0 %*
Generalized investment (£)	*1226282.*	*1222021.*	*- 0.3 %*

قدردانی

مؤلفین از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که امکانات لازم برای انجام این تحقیق را در اختیار قرار داده‌اند سپاسگذاری می‌نمایند.

۴ـ فهرست علائم و اختصارات

α: مقداربازدهی سطح شبکه مبدل حرارتی

μ: ویسکوزیته

ρ: دانسیته

$\alpha_{\Delta p}$: مقدار بازدهی سطح یک شبکه براساس افت فشار ثابت

ΔA: سطح اضافه شده به شبکه

ΔA_{DEB}: سطح اضافی مورد نیاز برای نصب روی شبکه به منظور رفع گلوگاه

ΔE: کاهش مصرف انرژی شبکه

α_h: مقدار بازدهی سطح یک شبکه براساس ضریب انتقال حرارت ثابت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

$\alpha_{max,\Delta p}$: مقدار بیشینه بازدهی سطح یک شبکه براساس افت فشار ثابت
$\alpha_{max,h}$: مقدار بیشینه بازدهی سطح یک شبکه براساس ضریب انتقال حرارت ثابت
Δp: افت فشار
ΔP_s: افت فشار جریان سمت پوسته
ΔP_t: افت فشار جریان سمت لوله
α_{tar}: مقدار بازدهی سطح هدفگذاری شده
ΔT_{LM}: متوسط لگاریتمی اختلاف درجه حرارت
ΔT_{min}: حداقل اختلاف درجه حرارت موجود بر روی منحنی‌های مرکب
$\Delta T_{min,r}$: حداقل اختلاف درجه حرارت موجود بر روی منحنی‌های مرکب برای باقیمانده جریانها در حالیکه مبدل مورد نظر نصب وپذیرفته شده باشد
$\Delta T_{min,tar}$: حداقل اختلاف درجه حرارت موجود بر روی منحنی‌های مرکب هدفگذاری شده
A_E: سطح مبدل حرارتی مورد نظر
A_{ex}: سطح موجود شبکه
$A_{H.E}$: سطح فرضی شبکه
A_{min}: حداقل سطح مورد نیاز برای شبکه مبدل حرارتی
$A_{min,r}$: حداقل سطح شبکه لازم برای باقیمانده جریانها در حالیکه مبدل مورد نظر نصب و پذیرفته شده باشد
CC: هزینه سرمایه گذاری سطح
Cp: مقدار جریان جرمی – حرارتی
E: مصرف انرژی
H: آنتالپی
h_F: ضریب انتقال حرارت فیلمی
h_{io}: ضریب انتقال حرارت داخل لوله
h_o: ضریب انتقال حرارت خارج لوله
h_s: ضریب انتقال حرارت داخل پوسته
I: سرمایه گذاری
K: ضریب هدایت حرارتی
$Q_{H,tar}$: مقدار مصرف منبع حرارتی گرم هدفگذاری شده
R_F: مقاومت رسوب دهی
$R_{F,i}$: مقاومت رسوب دهی داخل لوله
$R_{F,o}$: مقاومت رسوب دهی خارج لوله
S: پس انداز
U: ضریب کلی انتقال حرارت
A_{1-2}: سطح مبدل حرارتی براساس دو عبور برای طرف لوله
$A_{1-2,min,tar}$: حداقل سطح شبکه با تعداد عبور دو، برای طرف لوله
A_{1-1}: سطح مبدل حرارتی براساس یک عبور برای طرف لوله
$A_{1-1,\ min,\ tar}$: حداقل سطح شبکه با تعداد عبور واحد برای طرف لوله

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]

۵ـ منابع

1- Ahmad S. & Polley G.T.,
"Debottlenecking of Heat Exchanger Networks",
J. Heat Recovery & CHP , 10(4) , pp. 369-385, 1990.

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- Polley G.T., Panjeh Shahi M.H. & Nunez M.P.,
"Rapid Design Algorithms for Shell-and-Tube and Compact Heat Exhangers",
Trans. I. Chem. E. 69A, pp. 435-444, 1991.

5- Nelder, J.A., & R. Mead,
"A Simplex Method for Function Minimization",
The Computer Journal, 7: 308 (1965).

6- Himmelblau D.M. & Edgar T.F.,
"Optimization of Chemical Processes",
McGraw Hill, 1989.

7- Panjeh Shahi, M.H.,
"Pressure Drop Consideration in Process Integration",
Ph.D. Thesis , UMIST, 1992.

8- Karp A.D., Rutkowski M. & Wells C.J.,
"Debottlenecking of Refinery Units Using Pinch Technology",
Suite 1000, 1899 L Street , N.W. WASHINGTON D.C. 20036.

9- Smith R.,
"Chemical Process Design",
McGraw Hill, 1995.

۱۰- غفوریان صدیق، مهران؛
«اصلاح شبکه مبدلهای حرارتی به منظور رفع گلوگاه با درنظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۳.

۱۱- فلاحی، حمیدرضا؛
«بهینه سازی افت فشار در انتگراسیون فرایند»،
رساله دکتری، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، ۱۳۷۸.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-30]