

روش‌های ترمودینامیکی و ریاضی در بهینه‌سازی انرژی واحد تقطیر اتمسفریک پالایشگاه تهران

محمد رضا جعفری نصر^{۱*}، سیده سکینه چاوشی گیلانی نژاد^۲

۱- استاد مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرایند، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی،

واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۲۶

پیام‌نگار: drmasr50@yahoo.com

چکیده

از دیرباز، کاهش مصرف انرژی، افزایش ظرفیت تولیدی و افزایش سوددهی فرایند از لحاظ اقتصادی در واحدهای فرایندی مورد توجه بوده و برای اجرای آن، روش‌های مختلفی شامل روش‌های ترمودینامیکی و روش‌های ریاضی تدوین شده است. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی فرایند تقطیر اتمسفریک پالایشگاه تهران، به دو روش مختلف بررسی و نتایج حاصل از هر روش، گزارش شده است. در روش اول، با بهره‌گیری از نرم‌افزار Aspen Analyzer که بر اساس فناوری پینچ (روش ترمودینامیکی)، بهینه‌سازی انجام می‌شود، مقایسه بین طراحی موجود و طراحی آرمانی از پایه به عمل آمده و نتایج نشان می‌دهند که در وضعیت آرمانی میزان مصرف انرژی ۳۴٪ کمتر از حالت موجود خواهد بود. تعداد واحدهای انتقال حرارت مورد نیاز در حالت آرمانی ۲۱، مقدار مصرف انرژی $1/3 \times 10^4$ kW و مساحت مورد نیاز $2/2 \times 10^4$ m² گزارش شده است. در روش دوم، با بهره‌گیری از نرم‌افزار GAMS که بر پایه مدل Synheat تدوین شده، بهینه‌سازی به روش ریاضی انجام گرفته است. تعداد واحدهای انتقال حرارت مورد نیاز، در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Hevi، نتایج حاصل از بهینه‌سازی ریاضی، به شکل نمودار شبکه^۱ مبدل‌های حرارتی و جریانها، نمایش داده شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: بهینه‌سازی، پینچ، روش‌های ریاضی بهینه‌سازی، برج تقطیر اتمسفریک، شبکه مبدل‌های حرارتی،

نرم‌افزار Hevi.

۱. مقدمه

همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است. انرژی در بخشهای مختلف زندگی بشر، نقش مهمی ایفا می‌کند. بیشترین مصرف انرژی تولید شده در سراسر دنیا، به صنعت اختصاص دارد که بر اساس آمار انتشار یافته از اداره اطلاعات انرژی آمریکا^۲، این مقدار در حدود

در نزد مهندسان فرایند موضوع انرژی، نحوه تولید و مصرف آن

* تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

2. U.S. Energy Information Administration

1. Grid Diagram

انتخاب می‌شود (خطی، غیر خطی، مدل‌های توسعه یافته و دیگر روش‌ها) و با کمینه کردن یک تابع اقتصادی، پتانسیل امکان بهینه‌سازی ارزیابی می‌شود.

۲. اساس تحلیل پینچ

شالوده فناوری پینچ، قانون اول و دوم ترمودینامیک است. از قانون اول ترمودینامیک، به منظور محاسبه تغییرات آنتالپی (ΔH)، در جریانهای عبوری از مبدلهای حرارتی استفاده می‌شود. قانون دوم ترمودینامیک نیز، جهت جریان حرارتی را مشخص می‌کند. به این ترتیب، انرژی گرمایی تنها از جریان گرم به جریان سرد انتقال می‌یابد. در مبدل حرارتی، هیچ‌گاه دمای جریان گرم، کمتر از دمای جریان سرد نخواهد شد و دمای جریان سرد نیز هیچ‌گاه به دمایی بیشتر از دمای جریان گرم نخواهد رسید. در عمل، جریان گرم تا دمای تعریف شده یا همان دمای تقریباً مبدل حرارتی، سرد می‌شود. دمای تقریب، کمترین اختلاف دمای مجاز (ΔT_{min}) بین جریانهای یک مبدل حرارتی است، به طوری که انتقال حرارت بین جریانهای گرم و سرد انجام پذیرد. به دمایی که در آن ΔT_{min} ، مشاهده می‌شود، نقطه پینچ و یا شرایط پینچ گفته می‌شود. نقطه پینچ شرایطی را تعیین می‌کند که در آن، کمترین نیروی محرکه مجاز، برای انتقال حرارت بین جریانهای گرم و سرد یک مبدل حرارتی وارد می‌آید (۸ و ۳ و ۲).

بیشتر فرایندهای صنعتی، با انتقال حرارت از یک جریان فرایندی به جریان فرایندی دیگر و یا انتقال حرارت از خدمات جانبی^۳ به جریان فرایندی سر و کار دارند. در حال حاضر، سناریوی بحران انرژی در سراسر جهان ایجاد می‌کند طراحی فرایندها چنان باشد که تا حد امکان از جریانهای فرایندی به منظور انتقال حرارت استفاده شود و در نتیجه نیاز به سرویس‌های جانبی، به حداقل مقدار ممکن برسد.

برای رسیدن به بیشینه باز یافت انرژی^۴، به یک شبکه مبدلهای حرارتی مناسب نیاز است. طراحی چنین شبکه‌ای، با توجه به این که بیشتر فرایندها شامل تعداد زیادی جریانهای فرایندی و خدمات جانبی اند، کار ساده‌ای نیست. طراحی‌های سنتی، اغلب بدون توجه به مقوله باز یافت حرارتی صورت می‌پذیرفت و به همین

۵۴٪ است. میزان مصرف انرژی با گذشت زمان در حال افزایش است، به طوری که بنابر آمار همین اداره، مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی، از 73×10^{15} BTU در سال ۲۰۱۲، به 85×10^{15} BTU در سال ۲۰۴۰ در کشورهای عضو OECD^۱، خواهد رسید [۱].

در میان صنایع مختلف، صنعت پالایش نفت بیشترین سهم را در مصرف انرژی دارد و پس از آن صنایع شیمیایی، کاغذ و فلز در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

امروزه افزایش جمعیت جهانی، گسترش فناوری، کاهش منابع فسیلی، افزایش بهای انرژی، افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای بالا بردن ظرفیت تولید انرژی و دیگر عوامل سبب شده، مصرف بهینه انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شود تا بتوان با بهره‌گیری از تجهیزات، روش‌های کاهش مصرف و نیز مدیریت بهتر، تمامی فعالیت‌ها را با مصرف انرژی کمتری انجام داد و به این ترتیب، منابع انرژی را حفظ کرد.

بهینه‌سازی مصرف انرژی، علاوه بر صرفه‌های اقتصادی متضمن کاهش آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای نیز هست که این امر بر حفظ محیط زیست و جلوگیری از پدیده گرمایش زمین نیز تأثیر می‌گذارد.

در هر واحد فرایندی، از تجهیزات گوناگونی چون کوره، تبخیرکننده، انواع مبدلهای حرارتی و دیگر تجهیزات برای انتقال گرما سود می‌برند. انرژی لازم به منظور سرمایه‌گذاری و یا گرمایش در یک فرایند، یا از طریق عوامل جانبی انجام می‌شود که نیازمند مصرف انرژی اند و یا از جریانهای فرایندی برای انتقال گرما بهره می‌گیرند.

مبدلهای گرمایی، تجهیزاتی‌اند که در آنها، امکان استفاده از جریانهای فرایندی برای گرمایش و سرمایه‌گذاری فراهم است و از این جهت این تجهیزات در مقوله یکپارچه‌سازی انرژی، اهمیت زیادی دارند و طراحی بر این تجهیزات متمرکز است.

بطور کلی، روش‌های بهینه‌سازی و یکپارچه‌سازی انرژی، روش‌های تجربی، روش‌های ترمودینامیکی و روش‌های ریاضی را دربر می‌گیرد که هر کدام به نحوی، فرایند بهینه‌سازی را انجام می‌دهند. در روش‌های ترمودینامیکی، کمینه مقدار انرژی و سطح مورد نیاز در طراحی شبکه مبدلهای حرارتی بر اساس قانون اول و دوم ترمودینامیک، تعیین می‌شود، درحالی که در روش‌های ریاضی، با استفاده از رمزنگاری و بر اساس مدلی که برای انجام محاسبات

2. Temperature Approach
3. Utility
4. Maximum Energy Recovery (MER)

1. Organisation for Economic Co-operation and Development

موتورهای حرارتی، پمپ‌های حرارتی و دیگر تجهیزات، به منظور کاهش نیاز به خدمات جانبی سیستم ترکیبی، دید و بینش مناسبی ارائه می‌دهد.

- تحلیل کلی سایت: این مفهوم، تحلیل مصرف انرژی برای کل کارخانه را، که خود شامل چندین فرایند بود و دارای یک سیستم سرویس جانبی مرکزی است، امکان‌پذیر می‌کند.

۳. مروری بر روش‌های ریاضی بهینه‌سازی

با توجه به این‌که برنامه‌های کاربردی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی بسیار موفق‌آمیز بوده است (مثلاً، Vredeveld و Linnhoff، ۱۹۸۴؛ Naess و Gundersen، ۱۹۸۷) ممکن است این پرسش پیش آید که چه نیازی به تحقیق و توسعه روشهایی است که بر پایه ریاضیات عمل می‌کنند؟ آیا این کار صرفاً، به عنوان یک تحقیق آکادمیک، جالب توجه بوده یا این‌که این تکنیک‌ها قابلیت‌های منحصربه‌فردی دارند که فناوری پینچ و سایر رویه‌های دستی و ترسیمی از آنها بی‌بهره‌اند؟ علاوه بر این، روش‌های ریاضی تا چه حد می‌توانند جایگزین و یا مکمل سایر تکنیک‌هایی باشند که مهندسان در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی از آن بهره می‌گیرند [۴]؟

ترویج این پرسشها از اوایل دهه ۸۰، سبب شد تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شود. بهره‌گیری از روش‌های ریاضی طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی، نشان داد که این روش‌ها با جستجوی خودکار متغیرهای طراحی، نقش مهمی در تقابل^۵ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بازی می‌کنند. به علاوه، این روش‌ها را مهندسانی به کار گرفته‌اند که تخصصی در بهینه‌سازی ندارند و نیز به طور موثری موجب افزایش بهره‌وری شده است [۴].

در روش ریاضی، تمامی حالتها و آرایش‌های ممکن و معقول که در اینجا، شبکه مبدل‌های حرارتی به‌شمار می‌آیند، در نظر گرفته شده و با توجه به تابع هدف (هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و دیگر موارد) و انجام محاسبات پیچیده ریاضی، گزینه‌های ناممکن حذف و شبکه نهایی، انتخاب می‌شود [۹].

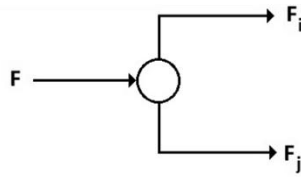
با همه این احوال، روشن است که تمامی مسائل، با روش‌های ریاضی قابل حل نیستند. مثلاً، مسائلی که در آنها تعداد حالات و گزینه‌ها

دلیل، هم هزینه‌های انرژی و هم هزینه‌های سرمایه‌گذاری در این طراحی‌ها بسیار گزاف بوده است. با توجه به مفهوم تحلیل پینچ، طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی به صورت کاملاً علمی و اصولی انجام می‌پذیرد. به طور خلاصه، مفاهیم کلیدی و اصطلاحات مورد استفاده در تحلیل پینچ، شامل موارد زیر است [۲]:

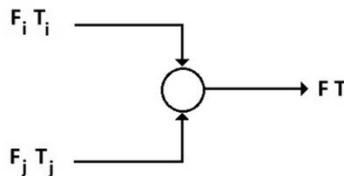
- منحنی مرکب^۱ (سرد و گرم): این نمودار، برای پیش‌بینی اهدافی برای تعیین کمترین انرژی مورد نیاز (خدمات جانبی گرم و سرد)، کمترین مساحت تماس حرارتی مورد نیاز و نیز کمترین تعداد مبدلهای ضروری، استفاده می‌شود.
- نقطه پینچ و ΔT_{min} : ΔT_{min} حاکی از آن است که منحنی‌های مرکب جریانهای سرد و گرم تا چه اندازه به یکدیگر نزدیک باشند، به طوری که قانون دوم ترمودینامیک نقض نشود (هیچ یک از مبدلهای حرارتی نباید دمای متقاطع داشته باشد).
- منحنی مرکب پایه^۲: این نمودار برای انتخاب خدمات جانبی مناسب (بیشینه بهره‌برداری از خدمات جانبی ارزان) به منظور تامین انرژی‌های لازم به کار می‌رود.
- هدف‌گذاری هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انرژی: این هدف‌گذاری، به منظور محاسبه کل هزینه‌های عملیاتی سالانه^۳ و هزینه‌های سرمایه‌گذاری مبدل‌های حرارتی انجام می‌شود.
- هدف‌گذاری هزینه‌های کل: این هدف‌گذاری، به منظور تعیین بازیافت حرارتی بهینه یا مقدار ΔT_{min} بهینه، از طریق تقابل انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام می‌شود. استفاده از این روش یک برآورد دقیق (در حدود ۱۰ تا ۱۵٪) از هزینه‌های بازیافت انرژی را پیش از طراحی سیستم، امکان‌پذیر می‌کند. ماهیت پینچ، سرعت بخشیدن به ارزیابی‌های اقتصادی است.
- اصول جایگزینی مناسب و +/-: اصول +/- روش‌هایی را ارائه می‌کند که از طریق آنها می‌توان فرایند را چنان تغییر داد که کمترین نیاز به خدمات جانبی و کاهش هزینه‌ها دست دهد. اصول جایگزینی مناسب، برای یکپارچگی تجهیزاتی چون برج تقطیر، تبخیرکننده‌ها، کوره‌ها،

1. Composite Curves (CC)
2. Grand Composite Curve (GCC)
3. Total Annual Cost (TAC)
4. Plus/Minus

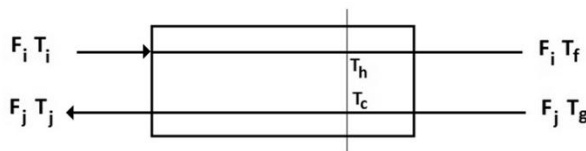
5. Trade-Off



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱. مدول‌های اساسی شبکه مبدل‌های حرارتی:
(الف) آمیزنده جریان، (ب) جداساز جریان، (پ) مبدل حرارتی

$$Q = UA [(T_g - T_f) - (T_j - T_i)] / \ln \frac{(T_g - T_f)}{(T_j - T_i)}$$

$$Q = UA \Delta T_{\log\text{-mean}}$$

که معادلات غیرخطی برقرار می‌کند.

سرانجام، توابع هزینه از این قرار بیان می‌شوند:

سطح مورد نیاز یک مبدل: $a + b A^c$

خدمات جانبی: $QCU^r \times QHU + CCU \times = CHU$

که در اینجا تابع سطح، یک معادله غیرخطی است و ثابت‌های a ، b و c با توجه به مواد به کار رفته، مقدار فشار و نوع مبدل‌ها تعیین می‌شوند [۸].

تابع خدمات جانبی نیز یک معادله خطی و بیانگر مجموع هزینه خدمات جانبی گرم و سرد است. این هزینه‌ها حاصل ضرب، کل سرویس جانبی مصرفی در بهای سرویس جانبی مربوطه است. تمامی این معادلات، اساسی‌اند و در مدل‌سازی ریاضی مبدل‌های

بسیار زیاد بوده و یا مسائلی که در آنها، ناهمگرایی^۱ برقرار خواهد بود، از جمله مسائلی‌ند که دارای محدودیت‌اند [۴]. در تحقیق حاضر، در مورد نحوه عملکرد روش‌های ریاضی توضیح مختصری داده شده تا به یک چشم انداز کلی از این روش‌ها دست یابیم.

اکثر روش‌های بهینه‌سازی ریاضی به منظور ایجاد شبکه مبدل‌های حرارتی، بر پایه این فرضیات استوارند [۴]:

۱. ظرفیت گرمایی ثابت جریانها
۲. دمای ورودی و خروجی ثابت
۳. ضریب انتقال حرارت ثابت
۴. تک گذر بودن مبدل‌های حرارتی
۵. هزینه ناچیز افت فشار
۶. هزینه‌های عملیاتی در قالب هزینه‌های خدمات جانبی در نظر گرفته شده باشد.
۷. هزینه سرمایه گذاری در قالب سطوح مورد نیاز در مبدل‌های حرارتی در نظر گرفته شده باشد.

بر پایه این فرضیات، سه مدول اساسی شبکه مبدل‌های حرارتی را، در شکل (۱)، مشاهده می‌کنید [۴].

موازنه جرم جداکننده

$$F = F_i + F_j$$

که معادله‌ای خطی برقرار می‌کند.

موازنه انرژی مخلوط کننده

$$F.T = F_i.T_i + F_j.T_j$$

که معادله‌ای غیرخطی برقرار می‌کند.

موازنه انرژی مبدل حرارتی

$$Q = F_i (T_f - T_i) = F_i (dT_c)$$

$$Q = F_j (T_g - T_j) = F_j (dT_h)$$

$$Q = UA(T_h - T_c) = F_i (dT_c) \rightarrow \frac{dT_c}{T_h - T_c} = \frac{UA}{F_i} \quad (1)$$

$$Q = UA(T_h - T_c) = F_j (dT_h) \rightarrow \frac{dT_h}{T_h - T_c} = \frac{UA}{F_j} \quad (2)$$

$$\rightarrow (2) - (1) \rightarrow \frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = \frac{UA}{F_j} - \frac{UA}{F_i}$$

$$\int_{T_i, T_j}^{T_g, T_f} \frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = \left(\frac{UA}{F_j} - \frac{UA}{F_i} \right) = \frac{UA}{Q} (T_g - T_j) - \frac{UA}{Q} (T_f - T_i)$$

$$\ln \frac{(T_g - T_f)}{(T_j - T_i)} = \frac{UA}{Q} (T_g - T_f) - \frac{UA}{Q} (T_j - T_i) = \frac{UA}{Q} [(T_g - T_f) - (T_j - T_i)]$$

2. CHU=Cost of Hot Utility, QHU=Total Hot Utility Usage, CCU=Cost of Cold Utility, QCU=Total Cold Utility Usage

1. Non-Convexity

۵: تخصیص دمای ورودی

۶: امکان پذیر بودن دماها

۷: محدودیت‌های منطقی برای انطباق سرویس‌های جانبی و انطباق جریانها

۸: محاسبه دماهای حاصل

جدول ۱. اطلاعات ورودی به Synheat و نتایج حاصل از آن [۶].

| ورودی‌ها | نتایج |
|---|--|
| تعداد جریانهای گرم و سرد | سرویس‌های جانبی مورد نیاز |
| ظرفیت حرارتی جریانها | انطباق جریانها و تعداد واحدها |
| دماهای اولیه و نهایی (مقادیر دما یا اختلاف دما) | دمای عملیاتی و بار حرارتی هر مبدل |
| خدمات جانبی موجود | پیکربندی شبکه و جریانها برای تمامی شاخه‌ها |
| قیمت‌ها (خدمات جانبی، مبدل‌های حرارتی و سایر موارد) | سطح مورد نیاز هر مبدل |

از جمله نرم‌افزارهایی که بهینه‌سازی را بر پایه Synheat انجام می‌دهند، می‌توان از نرم‌افزار $GAMS^3$ یاد کرد [۷].

این نرم افزار، حاوی رمزهای برنامه‌نویسی است که اجزای عمده آن ثابت‌اند و بخشهایی از آن نیز که شامل تعداد جریانهای گرم و سرد، تعداد مبدل‌ها، دمای جریانها و دیگر بخش‌هاست، به‌واسطه کاربر وارد می‌شود. قالب این فایل gms است.

سپس انتخاب گزینه Run از فهرست امکانات (منوی) File، عملیات بهینه‌سازی در مدت زمان بسیار کوتاهی انجام می‌شود و نتیجه، در فایلی که به صورت خودکار باز می‌شود و داری پسوند Lst است، قابل رؤیت خواهد بود. خلاصه نتایج نیز در قالب فایل متنی و فایل Put در مسیری که در انتهای فایل Lst ذکر شده، گزارش می‌شود. فایل Lst یک فایل تصویری Post Script است که از طریق نرم‌افزاری چون Adobe illustrator قابل مشاهده است.

از آنجایی که ترجیح کاربر آن است که نتایج حاصل از بهینه‌سازی به صورت نمودار شبکه مبدل‌های حرارتی و جریانها نمایش داده شود، در این تحقیق نرم‌افزار HeVi برای این کار به کار رفته است. این نرم‌افزار که در سال ۲۰۰۸ تدوین و نوشته شده، ابزار است که نتایج حاصل از بهینه‌سازی ریاضی را که در قالب عدد گزارش می‌شود، به صورت نمودار شبکه مبدل‌های حرارتی و جریانها، نمایش می‌دهد.

حرارتی به کار می‌روند. برخلاف ظاهر ساده این معادلات، بیشترین پیچیدگی ناشی از غیرخطی بودن آنهاست که یکی مربوط به تابع سطح و در دمای ۰ تا ۳ درجه، همگراست و دومی مربوط به موازنه‌های انرژی جداساز و مبدل حرارتی است که به واگرایی نتایج می‌انجامد. از آنجایی که روش‌های بهینه‌سازی ریاضی بر پایه فرضیاتی استوار است که موجب همگرایی نتیجه می‌شود و در مورد معادلات خطی، سرعت و توان زیادی دارند، از این‌رو برای فرمولبندی و حل مسائل بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی، این روش‌ها مورد توجه واقع می‌شوند. دلیل دوم پیچیدگی این معادلات، مربوط به نمایش و نحوه نشان دادن ساختار شبکه مبدلهاست. بطور خلاصه، ماهیت غیرخطی و نمایش اصولی گزینه‌ها (آلترناتیوها) عمده‌ترین تگناهای موجود در ابداع روش‌های ریاضی بهینه‌سازی شبکه مبدلهاست. هر چند که در سالهای اخیر، برخی از این مسائل حل شده‌اند [۴].

۴. برنامه Synheat بر پایه مدل MINLP

مدل Synheat، هزینه خدمات جانبی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای مساحت مورد نیاز و انتخاب جریان‌های تطبیقی^۱ را به طور همزمان بهینه‌سازی می‌کند تا در نهایت، هزینه‌های سالیانه به کمترین مقدار خود برسد. در واقع Synheat برنامه‌ای است که برای بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی به کار می‌رود و برای جریان‌های همدم و هم برای جریان‌های ناهمدم کاربرد دارد. این برنامه بر پایه مدل MINLP و در سال ۲۰۰۷ تدوین و نوشته شده است^۲ [۵]. بر اساس اطلاعات ورودی (جدول (۱))، این برنامه عملیات بهینه‌سازی را انجام می‌دهد و هزینه‌های نهایی کمینه را که معادل شبکه بهینه است، به عنوان خروجی تولید می‌کند.

معادلات (۱) تا (۸) توصیفی کلی از فرمول مدل Synheat هستند [۶].

= کمینه هزینه کل: ۱

هزینه سطح + هزینه ثابت + هزینه خدمات جانبی

موازنه انرژی برای هر جریان: ۲

موازنه انرژی بر هر مرحله: ۳

محاسبه خدمات جانبی گرم و سرد مورد نیاز: ۴

1. Matches

۲. توسط Ponce-Ortega, Jimenez-Gutierrez و Grossmann

3. General Algebraic Modeling System

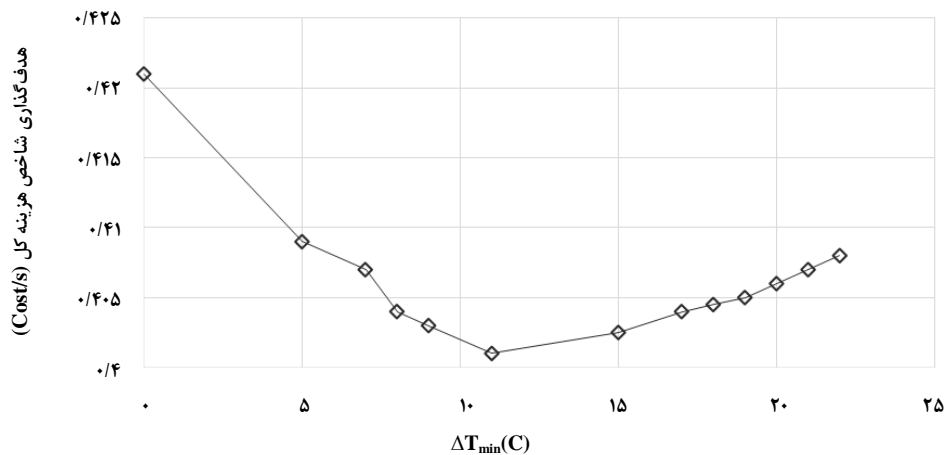
جدول ۵. اطلاعات جریانهای فرایندی.

| دبی × ضریب انتقال حرارت (kW/K) | دمای خروجی (K) | دمای ورودی (K) | جریان |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------------------|
| ۳۶۰ | ۳۶۰ | ۴۱۴ | گرم ۱ (چگالنده) |
| ۱۴ | ۳۱۹ | ۴۲۷ | گرم ۲ (نفتا) |
| ۲۵ | ۳۲۴ | ۴۷۷ | گرم ۳ (نفت گاز سنگین) |
| ۵۶ | ۳۲۷ | ۴۷۹ | گرم ۴ (نفت سفید) |
| ۷۶ | ۳۷۳ | ۵۳۵ | گرم ۵ (نفت گاز) |
| ۴۴ | ۴۰۹ | ۵۴۳ | گرم ۶ (خوراک ایزومکس) |
| ۱۹ | ۴۶۶ | ۵۷۳ | گرم ۷ (10/20 دریا) |
| ۱۵ | ۴۱۷ | ۵۷۶ | گرم ۸ (Slope Vac) |
| ۴۸ | ۴۴۷ | ۵۷۹ | گرم ۹ (30/40 دریا) |
| ۸۳ | ۴۵۷ | ۵۹۰ | گرم ۱۰ (تهمانده برج تقطیر) |
| ۴۷ | ۵۵۱ | ۵۳۷ | سرد ۱ (پمپ نفت گاز) |
| ۶۰ | ۵۱۳ | ۴۹۹ | سرد ۲ (پمپ نفت سفید) |
| ۱۰۱ | ۴۶۷ | ۴۶۱ | سرد ۳ (پمپ نفتا) |
| ۳۶۴ | ۶۳۳ | ۴۲۲ | سرد ۴ (مایع فلش) |
| ۲۸۹ | ۴۲۲ | ۳۰۵ | سرد ۵ (نفت خام اهواز) |
| | ۳۰۳ | ۲۸۸ | آب خنک کننده |
| | ۵۷۸ | ۶۵۸ | بخار |

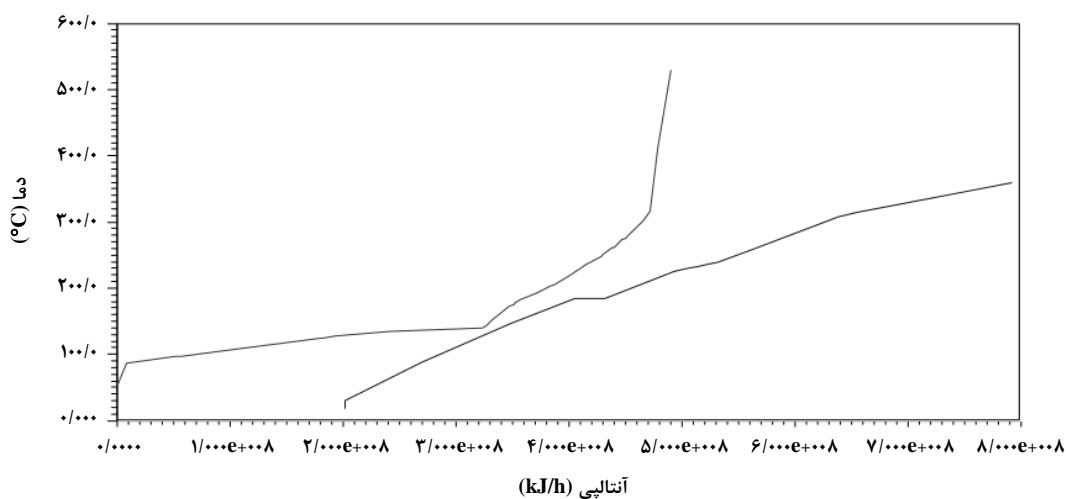
در شکل (۳)، منحنی هزینه‌های کل برحسب ΔT_{min} ، را مشاهده می‌کنید که منحنی در حوالی نقطه ۱۱ درجه سلسیوس کمینه شده است. از این جهت، تمامی محاسبات با در نظر گرفتن این مقدار برای ΔT_{min} انجام شده‌اند. در شکل (۴)، نمودار پایه در شکل (۵) منحنی مرکب پایه را مشاهده می‌کنید.

۶. بهره‌گیری از فناوری پینچ برای بهینه‌سازی

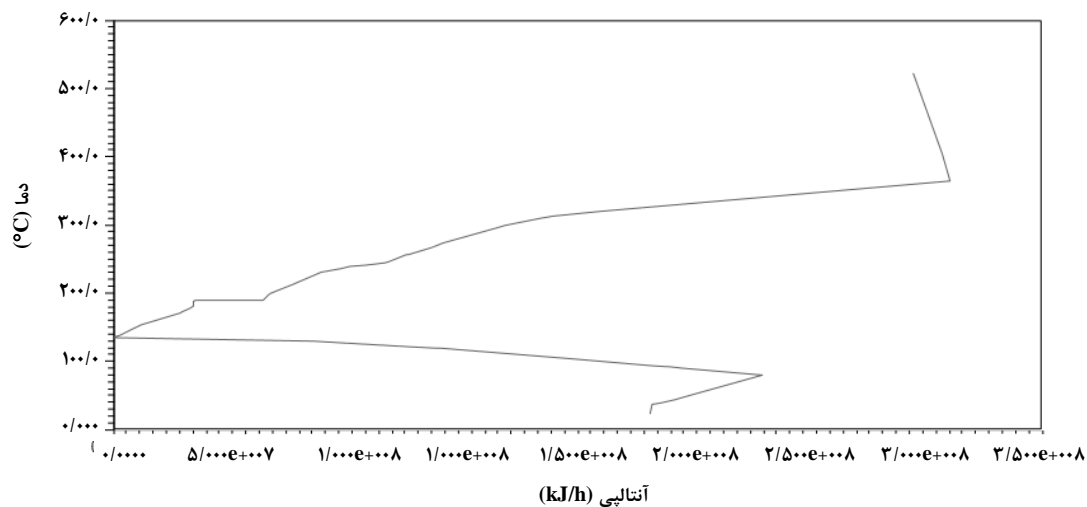
با اجرای برنامه Energy Analyzer برای فایل شبیه‌سازی شده، شکل‌ها و نمودارهایی به دست می‌آیند که می‌توان با بهره‌گیری از آنها، مقادیر به دست آمده برای خدمات جانبی گرم و سرد، تعداد واحدهای انتقال حرارت، سطوح انتقال حرارت، هزینه سرمایه‌گذاری و دیگر موارد را برای حالت موجود و حالت پینچ مقایسه کرد.



شکل ۳. منحنی هزینه‌های کل برحسب ΔT_{min} برای واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران.



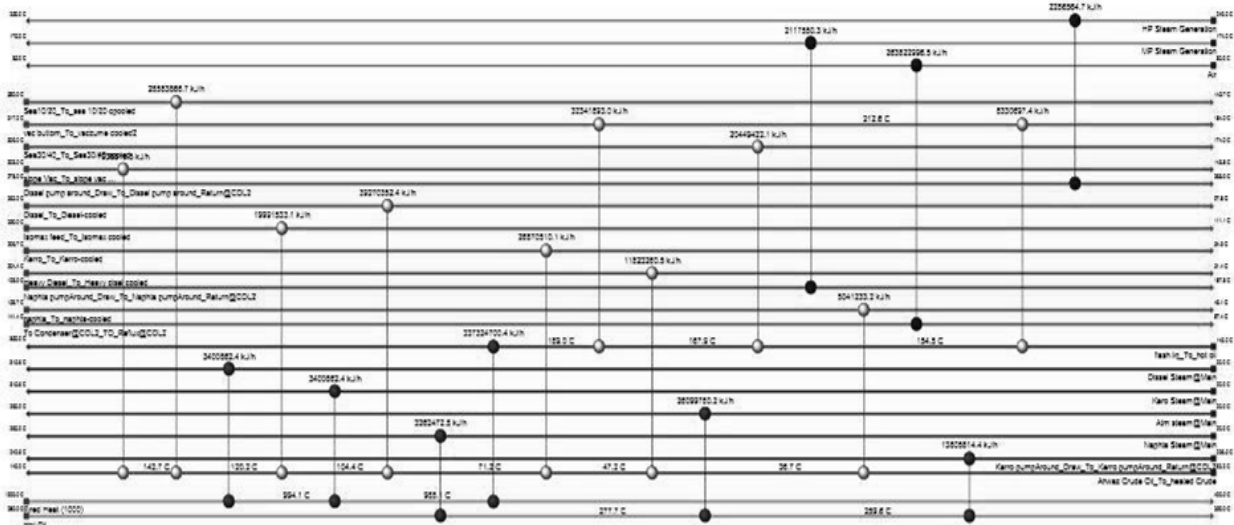
شکل ۴. نمودار مرکب برای واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران.



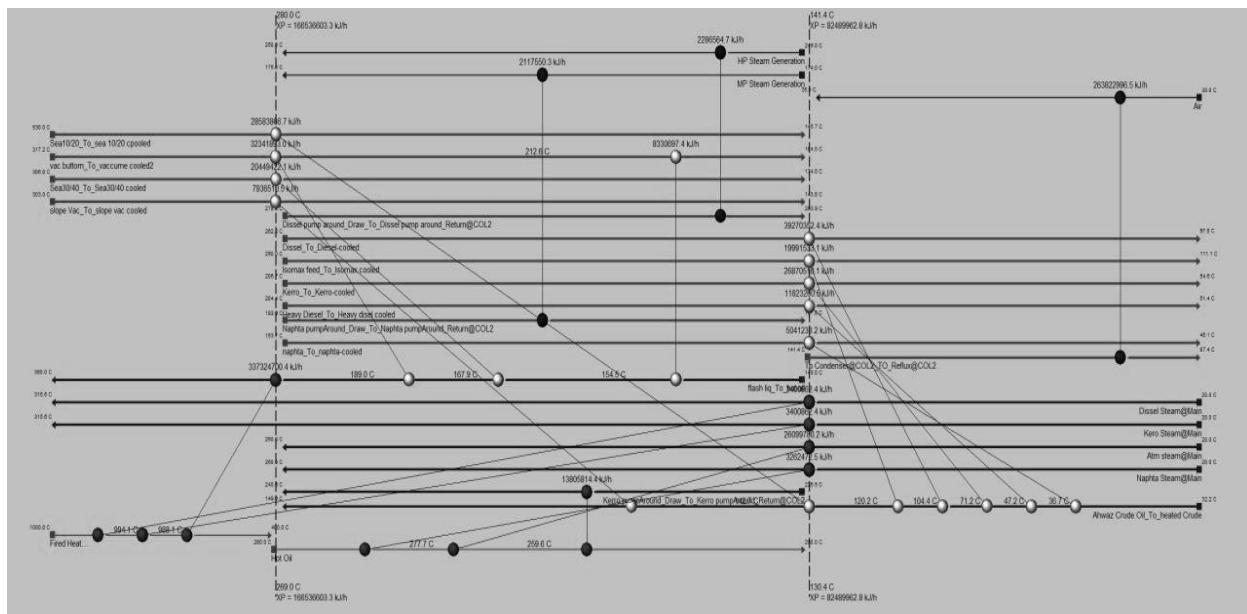
شکل ۵. منحنی مرکب پایه برای واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران.

عبور از پینچ^۱ اتفاق افتاده است. سرانجام، جدول (۶)، نمایانگر مقادیر به دست آمده برای خدمات جانبی گرم و سرد، تعداد واحدهای انتقال حرارت، سطوح انتقال حرارت و هزینه سرمایه‌گذاری برای حالت طراحی آرمانی، و جدول (۷)، نمایانگر همین مقادیر برای حالت موجود است.

در شکل (۶)، شبکه مبدل‌های حرارتی برای حالت پینچ و در شکل (۷) برای حالت موجود ترسیم شده است. در این شکل، دایره‌های توخالی نمایانگر مبدل‌های فرایندی از که تعداد آنها ده عدد است؛ دایره‌های توپر نیز، مبدل‌های عامل جانبی سرد و گرم‌اند. با استفاده از شکل (۷) می‌توان مبدل‌هایی را تعیین کرد که در آنها



شکل ۶. شبکه مبدل‌های حرارتی برای حالت پینچ واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران.



شکل ۷. شبکه مبدل‌های حرارتی برای حالت موجود واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران.

1. Cross Pinch

جدول ۶. نتایج هدف گذاری واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران در حالت طراحی آرمانی.

| هدف‌گذاری انرژی | |
|---------------------------|--------------------------|
| گرمايش (kJ/h) | $3/0.14 \times 10^4$ |
| سرمايش (kJ/h) | $1/721 \times 10^4$ |
| هدف‌گذاری سطح | |
| جريان همسو | $1/88 \times 10^4 (m^2)$ |
| ۲-۱ پوسته لوله | $2/2 \times 10^4$ |
| هدف‌گذاری تعداد واحدها | |
| کمينه کل | ۲۱ |
| کمينه MER | ۳۶ |
| پوسته ها | ۷۰ |
| هدف‌گذاری هزینه | |
| هزینه سرمايه گذاري (Cost) | $6/53 \times 10^6$ |
| هزینه عملياتی (Cost/s) | ۰/۳۵۹۹ |
| هزینه کل (Cost/s) | ۰/۴۱۱۷ |
| دمای پینچ | |
| سرد | گرم |
| ۲۶۹ C | ۲۸۰ C |
| ۱۳۴ C | ۱۴۱/۴ C |

جدول ۷. نتایج هدف‌گذاری واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران در حالت موجود.

| پارامتر | شبکه مبدلها | % هدف‌گذاری | پارامتر | شاخص هزینه | % هدف‌گذاری |
|--------------------------|---------------------|-------------|---------------------------|---------------------|-------------|
| گرمايش (kJ/h) | $3/691 \times 10^4$ | ۱۲۹/۱ | گرمايش (kJ/h) | ۰/۴۴۹۹ | ۱۳۶/۴ |
| سرمايش (kJ/h) | $2/598 \times 10^4$ | ۱۴۳/۴ | سرمايش (kJ/h) | - | - |
| تعداد واحدها | ۱۹ | ۵۱/۳۵ | هزینه عملياتی (Cost/s) | ۰/۴۴۶۶ | ۱۳۵/۴ |
| تعداد پوسته ها | ۵۱ | ۶۸ | هزینه سرمايه گذاري (Cost) | $3/228 \times 10^6$ | ۴۵/۹۱ |
| سطح کل (m ²) | $1/59 \times 10^4$ | ۶۷/۷۲ | هزینه کل (Cost/s) | ۰/۴۷۹۵ | ۱۱۹/۴ |

با مقایسه اطلاعات مربوط به جدول‌های (۶) و (۷) می‌توان پی برد که هزینه‌های سرمایه‌گذاری در حالت پینچ، Cost $6/5 \times 10^6$ و در حالت موجود، Cost $3/23 \times 10^6$ است. در واقع، با افزایش تعداد واحدهای انتقال حرارت در حالت پینچ، سطح انتقال حرارت و در

باید گفت که کمترین دمای تقریب (ΔT_{min})، ۱۱ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. برای گرم کردن جریان ورودی به برج، از کوره استفاده شده اما از آنجا که در نرم افزار GAMS، تنها بخار را می‌توان به عنوان عامل جانبی گرم وارد کرد، از این رو فرض می‌شود که کوره واحد با بار حرارتی مشخص، بخار خشک HP، با دمای ۶۵۸ کلوین تولید می‌کند.

اطلاعات مورد نیاز در فایل gms نرم‌افزار GAMS مطابق شکل (۸)، در قسمت‌های مربوطه وارد می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌شود، دماهای ورودی و خروجی، ظرفیت حرارتی، شدت جریان و دیگر اطلاعات در مورد هر یک از جریانهای گرم و سرد در قسمت‌های مربوطه وارد شده‌اند.

با اجرای نرم افزار، نتایج طبق شکل (۹)، به دست می‌آید. در هر سطر این شکل، دماهای میانی محاسبه شده، نشان داده می‌شود. در بخش مبدل نیز، نشان داده شده که کدامیک از جریانهای سرد و گرم با یکدیگر انرژی مبادله کرده‌اند. در انتهای شکل نیز، مقدار مساحت مورد نیاز، تعداد واحد و خدمات جانبی سرد و گرم آورده شده است.

نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری افزایش یافته است. مجموع انرژی لازم برای گرمایش و سرمایش در حالت پینچ، $4/7 \times 10^8$ kJ/h و در حالت موجود، $6/3 \times 10^8$ kJ/h است که این خود سبب کاهش ۳۴ درصدی هزینه‌های عملیاتی حالت پینچ نسبت به حالت موجود شده است. سرانجام، با مقایسه هزینه‌های کل سالیانه، می‌توان پی برد که هزینه‌های کل سالیانه در حالت پینچ، ۱۶٪ کمتر از هزینه کل سالیانه در حالت موجود است.

۷. استفاده از نرم‌افزار GAMS برای بهینه‌سازی

اطلاعات مورد نیاز برای بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS شامل تعداد جریان‌های گرم و سرد، دمای ابتدایی و انتهایی هر یک از جریانها، ظرفیت حرارتی جریانها، شدت جریانها، خدمات جانبی موجود، قیمت خدمات جانبی و دیگر اطلاعات است. در اینجا، هدف مقایسه نتایج حاصل از نرم‌افزار GAMS و Energy Analyzer برای تعداد واحدهای انتقال حرارت، مساحت و مقادیر خدمات جانبی لازم است. در جدول (۵)، اطلاعات لازم ورودی به نرم افزار GAMS برای واحد اتمسفریک پالایشگاه درج شده است.

```

Atm Unit corection2.lst | Atm Unit corection2.gms
* hot
thin('1')=414; thout('1')=360; fh('1')=360; hh('1')=1;
thin('2')=427; thout('2')=319; fh('2')=14; hh('2')=1;
thin('3')=477; thout('3')=324; fh('3')=25; hh('3')=1;
thin('4')=479; thout('4')=327; fh('4')=56; hh('4')=1;
thin('5')=535; thout('5')=373; fh('5')=76; hh('5')=1;
thin('6')=543; thout('6')=409; fh('6')=44; hh('6')=1;
thin('7')=573; thout('7')=466; fh('7')=19; hh('7')=1;
thin('8')=576; thout('8')=417; fh('8')=15; hh('8')=1;
thin('9')=579; thout('9')=447; fh('9')=48; hh('9')=1;
thin('10')=590; thout('10')=457; fh('10')=83; hh('10')=1;

* cold
tcin('1')=537; tcout('1')=551; fc('1')=47; hc('1')=1;
tcin('2')=499; tcout('2')=513; fc('2')=60; hc('2')=1;
tcin('3')=461; tcout('3')=467; fc('3')=101; hc('3')=1;
tcin('4')=422; tcout('4')=633; fc('4')=364; hc('4')=1;
tcin('5')=305; tcout('5')=422; fc('5')=289; hc('5')=1;

* costs and coefficients
hucost =80; hucoefficient =150; thuin =658; thuout =578; hhu =1;
cucoefficient =150; tcuin =288; tcuout =303; hcu =1;

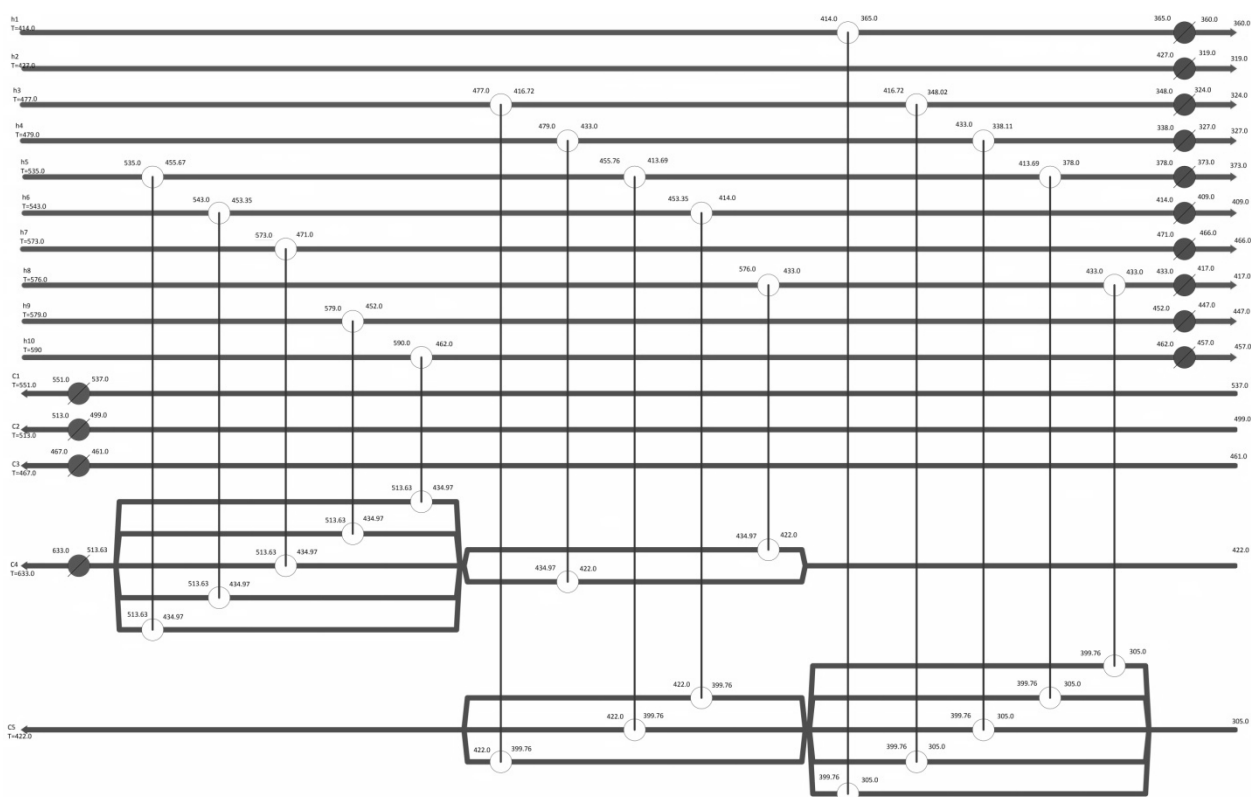
```

شکل ۸. نحوه ورود اطلاعات مربوط به تعداد جریانهای گرم و سرد واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران در فایل نرم‌افزار GAMS.

| (Stages 4.00 | | | | | | | | |
|---------------|--------|---------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|-------|
| (Streams | | | | | | | | |
| (h1 | 414.00 | 414.00 | 414.00 | 414.00 | 365.00 | 360.00 | 360.00 | 1.00) |
| (h2 | 427.00 | 427.00 | 427.00 | 427.00 | 427.00 | 319.00 | 14.00 | 1.00) |
| (h3 | 477.00 | 477.00 | 477.00 | 416.72 | 348.02 | 324.00 | 25.00 | 1.00) |
| (h4 | 479.00 | 479.00 | 479.00 | 433.00 | 338.11 | 327.00 | 56.00 | 1.00) |
| (h5 | 535.00 | 535.00 | 455.67 | 413.69 | 378.00 | 373.00 | 76.00 | 1.00) |
| (h6 | 543.00 | 543.00 | 453.35 | 414.00 | 414.00 | 409.00 | 44.00 | 1.00) |
| (h7 | 573.00 | 573.00 | 471.00 | 471.00 | 471.00 | 466.00 | 19.00 | 1.00) |
| (h8 | 576.00 | 576.00 | 576.00 | 433.00 | 433.00 | 417.00 | 15.00 | 1.00) |
| (h9 | 579.00 | 579.00 | 452.00 | 452.00 | 452.00 | 447.00 | 48.00 | 1.00) |
| (h10 | 590.00 | 590.00 | 462.00 | 462.00 | 462.00 | 457.00 | 83.00 | 1.00) |
| (c1 | 551.00 | 537.00 | 537.00 | 537.00 | 537.00 | 537.00 | 47.00 | 1.00) |
| (c2 | 513.00 | 499.00 | 499.00 | 499.00 | 499.00 | 499.00 | 60.00 | 1.00) |
| (c3 | 467.00 | 461.00 | 461.00 | 461.00 | 461.00 | 461.00 | 101.00 | 1.00) |
| (c4 | 633.00 | 513.63 | 434.97 | 422.00 | 422.00 | 422.00 | 364.00 | 1.00) |
| (c5 | 422.00 | 422.00 | 422.00 | 399.76 | 305.00 | 305.00 | 289.00 | 1.00) |
|) | | | | | | | | |
| (Exchangers | | | | | | | | |
| (1 | h5 | c4 | 6028.93) | | | | | |
| (1 | h6 | c4 | 3944.71) | | | | | |
| (1 | h7 | c4 | 1938.00) | | | | | |
| (1 | h9 | c4 | 6096.00) | | | | | |
| (1 | h10 | c4 | 10624.00) | | | | | |
| (2 | h3 | c5 | 1506.97) | | | | | |
| (2 | h4 | c4 | 2576.00) | | | | | |
| (2 | h5 | c5 | 3190.36) | | | | | |
| (2 | h6 | c5 | 1731.29) | | | | | |
| (2 | h8 | c4 | 2145.00) | | | | | |
| (3 | h1 | c5 | 17640.00) | | | | | |
| (3 | h3 | c5 | 1717.60) | | | | | |
| (3 | h4 | c5 | 5314.07) | | | | | |
| (3 | h5 | c5 | 2712.71) | | | | | |
| (3 | h8 | c5 | 0.00) | | | | | |
|)) | | | | | | | | |
| Total time | = | 23.95 [s] | | | | | | |
| tmap | = | 11.00 [C] | | | | | | |
| Total area | = | 6635.91 [m ²] | | | | | | |
| Units | = | 28.00 [-] | | | | | | |
| Hot Utility | = | 45555.36 [kW] | | | | | | |
| Cold Utility | = | 6124.36 [kW] | | | | | | |

شکل ۹. نتایج حاصل از بهینه‌سازی واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران توسط نرم‌افزار GAMS.

سرانجام، با استفاده از نرم افزار HeVi شبکه مبدل های حرارتی مانند شکل (۱۰)، خواهد شد.



شکل ۱۰. ترسیم شبکه مبدل های حرارتی واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران با استفاده از نرم افزار HeVi.

۸. نتیجه گیری کلی با مقایسه این نتایج می توان پی برد که تعداد واحدهای انتقال حرارت، پس از بهینه سازی با نرم افزار GAMS، ۲۸ است و مجموع انرژی لازم برای گرمایش و سرمایش نیز به $1/9 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ رسیده است.

نتایج مربوط به بهینه سازی واحد اتمسفریک پالایشگاه تهران با روش ترمودینامیکی (نرم افزار Energy Analyzer) و روش ریاضی (نرم افزار GAMS)، بطور خلاصه در جدول (۸) درج شده است.

جدول ۸. مقایسه نتایج حاصل از نرم افزارهای Energy Analyzer و GAMS.

| پارامتر | تعداد واحدهای انتقال حرارت (Units) | خدمات جانبی گرم مورد نیاز (kW) | خدمات سرویس جانبی سرد مورد نیاز (kW) | خدمات جانبی مورد نیاز (kJ/h) |
|--|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| موجود | ۱۹ | ۱۰۲۵۰۰ | ۷۲۱۶۷ | $6/28 \times 10^4$ |
| روش ترمودینامیکی (نرم افزار Energy Analyzer) | ۲۱ | ۸۳۳۳۳ | ۴۷۷۷۷ | $4/7 \times 10^4$ |
| روش ریاضی (نرم افزار GAMS) | ۲۸ | ۴۵۵۵۵ | ۶۱۲۴ | $1/9 \times 10^4$ |

۱۰. سپاسگزاری

از آقای مهندس علیرضا کاظم‌پور، مدیرعامل شرکت مهندسی ایده‌پردازان شریف، و پروفسور Laukkanen، مدیر پروژه و مدیر آزمایشگاه دانشکده مکانیک دانشگاه Aalto هلسینکی، به جهت کمک‌های بی‌دریغ و آموزش‌های مفید ایشان سپاسگزاریم.

مراجع

- [1] U. S. Energy Information Administration, "International Energy Outlook 2016", U. S. Energy Information Administration, Washington, 113, (2016).
- [2] Online Chemical Engineering Information, Pinch Technology: Basics for Beginner, www.cheresources.com/pinchtech1.shtml
- [3] Linnhoff, M., "Introduction to Pinch Technology", Targeting House Gadbrook Park, Northwich, Cheshire, cw9 7uz, England, 6-13, (1998).
- [4] Grossmann, I. E., "Mathematical Methods for Heat Exchanger Network Synthesis", Pittsburgh, Carnegie Mellon University, 1-7, (1992).
- [5] Synheat Interface, <http://newton.cheme.cmu.edu/interfaces/synheat/synheat.html>
- [6] Nykopp, J., Laukkanen, T., Tveit, T. M., Fogelholm, C. J., "A Tool for Automatic Heat Flow Grid Visualisation for Heat Exchanger Networks Developed Using the SYNHEAT Model", 18th International Congress of Chemical and Process Engineering, 1-5, (2008).
- [7] GAMS Development Corp. & GAMS Software GmbH, <https://www.gams.com>

[۸] جعفری نصر، م. ر.، کاظم‌زاده فریزه‌ندی، ا. ع.، "یکپارچه کردن انرژی در فرایندهای شیمیایی به منظور صرفه‌جویی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرایندهای نفت، گاز و پتروشیمی"، چاپ اول، انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، (۱۳۸۸).

[۹] علی هاشمی، م.، "بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش ظرفیت واحد تقطیر پالایشگاه تهران با استفاده از تکنولوژی پینچ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران، (۱۳۸۱).

[۱۰] دستورالعمل راه‌اندازی و بهره‌برداری واحدهای فرایندی پالایشگاه تهران (برگه‌های داده متداول در پالایشگاه تهران برای آگاهی از اطلاعات واحدهای پالایشگاه).

همانطور که مشاهده می‌شود، تعداد واحدهای انتقال حرارت، به کمک نرم‌افزار Aspen Analyzer، ۲۱ و با نرم‌افزار GAMS ۲۸ گزارش شده است. همچنین، انرژی لازم برای گرمایش، با نرم‌افزار GAMS، تقریباً نصف انرژی در Aspen Analyzer برآورد شد و میزان سودمندی سرد، نیز به طور چشمگیری کاهش یافت. در واقع، با بهینه‌سازی به کمک GAMS، تعداد واحدهای انتقال حرارت و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری، افزایش و در عوض میزان مصرف سرویس‌های جانبی گرم و سرد به میزان چشمگیری، کاهش یافته است.

باید توجه داشت که در روش ریاضی، همواره تمامی احتمالات در نظر گرفته می‌شود تا پاسخ بهینه از لحاظ کمیتی، حاصل شود. حال آنکه، ممکن است ساختار نهایی، صد درصد قابل دستیابی نباشد و اجرای آن، با محدودیت‌هایی روبه‌رو شود. از این جهت، شاید بهتر است با در نظر گرفتن نتایج حاصل از هر دو روش، بهترین انتخاب برای سیستم، اجرا شود.

در این جهت، پیشنهاد می‌شود در ادامه این کار، محدودیت‌های ساختاری حاصل از مدل ریاضی و امکان اجرایی شدن آن، بررسی شود.

۹. فهرست نمادها

A : مساحت انتقال حرارت

F : جریان

ΔH : تغییرات آنتالپی

h : ضریب انتقال حرارت

Q : آهنگ انتقال حرارت

T : دما

ΔT_{min} : کمترین اختلاف دمای مجاز

U : ضریب کلی انتقال حرارت

اندیس‌ها

f, j : خروجی

i, g : ورودی