

توزیع بهینه بار حرارتی در شبکه‌های مبدل حرارتی با روش Pinch

محمدحسن پنجه‌شاهی*⁺، علی‌علی مندگاری، هادی رضایی دیزجیکان، حمیدرضا فلاحی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۲۳۴-۱۱۳۶۵

چکیده: توانایی شبکه‌های مبدل حرارتی در پذیرش آرایش‌های دمایی گوناگون دمایی و تأثیر این آرایش‌ها بر بار مبدل‌ها و تفاوت دمای متوسط لگاریتمی، منجر به ایجاد آرایش‌های متفاوتی از سطوح انتقال حرارت مبدل‌های جدید و میزان انرژی مصرفی می‌شود. تأثیر مستقیم این آرایش‌ها بر هزینه‌ی کل سرمایه‌گذاری سالیانه، ایده امکان بهینه‌سازی شبکه‌های مبدل حرارتی با تغییر بار مبدل‌ها را در ذهن ایجاد می‌کند. نتیجه‌های نزدیک و بهتر حاصل از این روش نسبت به نتیجه‌های نرم افزار *SPRINT*، حاکی از قوت روش ارایه شده در بهینه‌سازی توزیع بار است. تابع هدف بهینه‌سازی توزیع بار حرارتی در طراحی جدید، دستیابی به کمینه هزینه کل سرمایه‌گذاری سالیانه و در طراحی اصلاحی، دستیابی به کمینه دوره بازگشت برای یک هزینه سرمایه‌گذاری یا دستیابی به بیشینه سود حاصل از ذخیره انرژی برای یک دوره بازگشت است. بهبود ۴ درصدی هزینه کل سرمایه‌گذاری سالیانه در شبکه با طراحی جدید و بهبود ۶/۵ درصدی هزینه سرمایه‌گذاری همراه بهبود ۱۱ درصدی دوره بازگشت در شبکه مورد مطالعه طراحی اصلاحی، بیانگر اهمیت در نظر گرفتن بهینه‌سازی توزیع بار در انتگراسیون حرارتی فرایند است.

واژه‌های کلیدی: انتگراسیون فرایند، تحلیل پینچ، شبکه‌های مبدل حرارتی، دوره بازگشت، هزینه سرمایه‌گذاری، بهینه‌سازی، توزیع بهینه بار، طراحی جدید، طراحی اصلاحی.

KEY WORDS: Process integration, Pinch analysis, Heat exchanger networks, Payback, Investment, Optimization, Optimum heat load distribution, Grass-root design, Retrofit study.

مقدمه

رابطه‌ی کلی انتقال حرارت در مبدل طبق رابطه (۱)، بیانگر تأثیر بار مبدل و تفاوت دماهای دو طرف مبدل و ضریب‌های انتقال حرارت روی سطح هستند.

$$Q_i = U_i \times A_i \times F_{Ti} \times LMTD_i \quad (1)$$

$$U_i = \left(h_{ij}^{-1} + h_{ik}^{-1} + R_{ij} + R_{ik} \right)^{-1}$$

تفاوت دما در دو طرف مبدل نیز بر اساس رابطه‌های موازنه‌ی انرژی (۲) و (۳) از بار مبدل تأثیر می‌پذیرند.

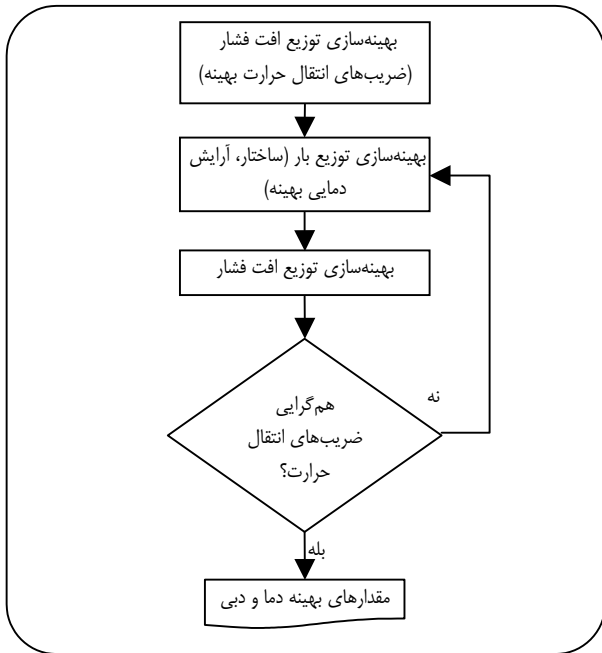
$$Q_i = (mcp)_{ij} \times (T_{ij} - T_{ij+1}) \quad (2)$$

$$Q_i = (mcp)_{ik} \times (T_{ik+1} - T_{ik}) \quad (3)$$

به لحاظ تأثیر مستقیم ضریب‌های انتقال حرارت بر سطح مبدل و ثابت در نظر گرفتن این ضریب‌ها در طول عملیات بهینه‌سازی توزیع بار، برای رسیدن به ضریب‌های نزدیک به ضریب‌های بهینه، ابتدا توزیع افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها را بهینه می‌کنیم. ضریب‌های نزدیک بهینه در توزیع بهینه بار، ساختاری

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: mhpanj@ut.ac.ir



شکل ۱- الگوریتم ساختار کلی حاکم بر بهینه‌سازی.

کمینه روی مبدل‌ها شود.

تغییرهای بار و تفاوت دمایی دو سر مبدل و تأثیر مستقیم این تغییرها بر سطح تبادل حرارت این ایده را در ذهن ایجاد می‌کند که توزیع بهینه‌ی بار و به‌دنبال آن توزیع بهینه‌ی آرایش‌های دمایی در شبکه به چه نحو خواهد بود.

با تغییر بار مبدل‌ها و بررسی عدم نقض حداقل تفاوت دما در هر مرحله، بهینه‌سازی را تا رسیدن به حداقل تابع سرمایه‌گذاری در طراحی جدید و رسیدن به حداکثر سود حاصل از ذخیره انرژی در یک دوره بازگشت ثابت یا حداقل دوره بازگشت برای یک هزینه سرمایه‌گذاری ثابت در طراحی اصلاحی ادامه می‌دهیم.

پوشش بار جریان‌ها به‌وسیله‌ی مبدل‌های قرار گرفته بر روی آن جریان، جلوگیری از انتقال حرارت معکوس (از جریان سرد به گرم)، عدم نقض حداقل تفاوت دما و رعایت گستره دمایی هر جریان از محدودیت‌های حاکم بر بهینه‌سازی توزیع بار در طراحی جدید و طراحی اصلاحی است.

در طراحی اصلاحی ثابت بودن سطح مبدل‌های موجود و ثابت بودن هزینه سرمایه‌گذاری یا دوره بازگشت به محدودیت‌های حاکم بر بهینه‌سازی اضافه می‌شود.

تغییر بار هر یک از مبدل‌ها سبب می‌شود که آرایش دمایی و در نتیجه $LMTD^{(1)}$ تغییر کرده، سطح جدید با توجه به بار حرارتی

(آرایش دمایی) بهینه‌تر و ساده‌تر نسبت به حالتی که به‌طور مستقیم از ضریب‌های به‌دست آمده از سنتز شبکه استفاده کنیم، خواهد داد.

در ساختار نزدیک بهینه، امکان حذف و بهینه‌سازی سطح‌های انتقال حرارت برای رسیدن به حداقل هزینه کلی سرمایه‌گذاری سالیانه در نظر گرفته شده است. لذا توزیع بهینه افت فشار روی ساختاری بهینه‌تر و ساده‌تر (در صورت حذف مبدل در بهینه‌سازی توزیع بار)، صورت خواهد گرفت.

افت فشارهای نزدیک بهینه حاصل از توزیع بهینه افت فشار به همراه سطح‌های نزدیک بهینه ساختاری که از توزیع بهینه بار به‌دست آمده است، ضریب‌های انتقال حرارت نزدیک‌تر به بهینه و در برخی موردها ضریب‌های انتقال حرارت بهینه را ارائه خواهد کرد. تکرار دوباره مرحله‌های بالا بی‌شک ما را به ساختار بهینه شبکه مبدل حرارتی خواهد رساند. لذا ساختار کلی بهینه‌سازی شبکه مطابق با شکل ۱، به صورت زیر است:

الف- دستیابی به ضریب‌های انتقال حرارت نزدیک بهینه با توزیع بهینه افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها.

ب- توزیع بهینه بار مبدل‌ها برای بررسی امکان تغییر دماها و شکستن حلقه‌ها با ضریب‌های به‌دست آمده بالا (آرایش نزدیک بهینه).

ج- یک‌بار دیگر مرحله "الف" را برای ساختار به‌دست آمده در "ب" تکرار می‌کنیم.

د- برای اطمینان خاطر از نتیجه بهینه‌سازی، مرحله‌های بالا را یک‌بار دیگر تکرار می‌کنیم.

آنچه که روی نتیجه بهینه‌سازی مرحله‌ی "ب" تأثیر دارد، مقدار ضریب‌های انتقال حرارت است که اگر نزدیک بهینه باشد مطلوب است.

آنچه روی بهینه‌سازی مرحله‌ی "ج" تأثیر دارد ساختار، نسبت تقسیم جریان‌ها، دماها و بار حرارتی مبدل‌هاست. لذا بهتر است که در مرحله "ب" این ساختار با ضریب‌های انتقال حرارت نزدیک بهینه به‌دست آمده از مرحله "الف" بهینه شود.

توزیع بهینه بار مبدل‌ها

افزایش بار مبدل، کاهش بار دست‌کم یکی از مبدل‌هایی که با آن مبدل روی یک جریان قرار دارند را به دنبال خواهد داشت. این افزایش ممکن است موجب کاهش یا افزایش تفاوت دمایی

(1) Log Mean Temperature Difference

ورودی و خروجی جریان‌ها و دبی هر جریان مشخص می‌کنیم. ضریب‌های انتقال حرارت جریان‌ها را ضریب‌های انتقال حرارت بهینه‌ای که از بهینه‌ساز توزیع افت فشار به دست آمده، قرار می‌دهیم.

به لحاظ این که بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و توزیع بهینه‌ای آن روی مبدل‌ها در پژوهش دیگری صورت گرفته است [۶]، در بهینه‌سازی توزیع بار، پارامتر افت فشار را لحاظ نمی‌کنیم. لذا در بهینه‌سازی شبکه در طراحی جدید تابع هدف سرمایه‌گذاری کل تنها شامل هزینه سطح‌های نصب شده و هزینه انرژی مصرفی است و در طراحی اصلاحی هزینه سرمایه‌گذاری تنها شامل هزینه سطح‌های جدید نصب شده است.

میزان ذخیره انرژی نیز برابر میزان کاهش در مصرف سرویس‌های گرم و سرویس‌های سرد (اگر سردکننده‌ها هوایی^(۳) باشند) است. دوره بازگشت حاصل تقسیم هزینه سرمایه‌گذاری بر میزان ذخیره انرژی است.

۲- مشخص کردن مبدل‌های مستقل (متغیرها)

رابطه‌ی موازنه‌ی حرارتی در واحدهای تبادل کننده حرارت بیانگر وجود ۴ متغیر شدتی (دما) و ۳ متغیر مقداری دبی جریان گرم و دبی جریان سرد و بار مبدل است. به لحاظ وجود ۲ رابطه بین ۷ متغیر ذکر شده، درجه‌ی آزادی هر مبدل ۵ است.

مبدل‌ها به دو بخش مبدل‌های موجود و مبدل‌های جدید تقسیم می‌شوند که تفاوت آنها در ثابت بودن ساختار مبدل (سطح، تعداد لوله‌ها و پوسته‌ها و آرایش آنها) و متغیر بودن آن است.

واحدهای تبادل کننده حرارت به سه شکل مبدل، هیتر و کولر در شبکه ظاهر می‌شوند که تفاوت بین آنها در قرار گرفتن جریان‌های فرایندی در برابر جریان‌های فرایندی، سرویس گرم و سرویس سرد است. با توجه به اینکه دبی جریان‌ها در جریان‌های فرایندی ثابت و در سرویس‌های گرم و سرد متغیر است و همچنین دماهای ورودی و خروجی سرویس‌ها به هیتر و کولر ثابت است، لذا در مبدل‌های جدید با مشخص شدن سه دما از چهار دمای گرم و سرد، ورودی به مبدل‌ها و خروجی از مبدل‌ها یا مشخص شدن دو دما از دماهای ذکر شده و سطح انتقال حرارت وضعیت مبدل مشخص و در مبدل‌های موجود با مشخص شدن دو دما وضعیت مبدل مشخص می‌شود.

و LMTD جدید و ضریب انتقال حرارت کلی^(۱) متناسب با توزیع افت فشار محاسبه می‌شود. پذیرش یا عدم پذیرش توزیع بار جدید (آرایش دمایی جدید) در طراحی جدید به وسیله‌ی محاسبه‌ی تابع هدف (هزینه سرمایه‌گذاری کل T.A.C.^(۲)) و در طراحی اصلاحی به وسیله‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و دوره بازگشت معلوم می‌شود. اگر تابع هدف منوط به هزینه سرمایه‌گذاری ثابت باشد و آرایش دمایی جدید دارای دوره بازگشتی کمتر از آرایش دمایی پیشین باشد، آن را می‌پذیریم. اگر تابع هدف منوط به دوره بازگشت ثابت باشد و آرایش دمایی جدید دارای سود ذخیره انرژی بیشتری نسبت به آرایش دمایی پیشین باشد، آن را می‌پذیریم.

مراحل بهینه‌سازی توزیع بار به ترتیب زیر است:

۱- مشخص کردن شبکه‌ی مبدل حرارتی.
۲- مشخص کردن مبدل‌های وابسته و مستقل.
۳- محاسبه‌ی سطح، دماها و دبی‌های مبدل‌های با درجه آزادی صفر.

۴- تعیین حداقل و حداکثر بار مبدل‌ها و مشخص کردن محدوده‌های مجاز تغییر دماهای سیال سرد و گرم، ورودی و خروجی به مبدل‌ها.

۵- بررسی عدم نقض حداقل تفاوت دما در محدوده‌های دمایی متناظر روبرو و رفع آن با محدودتر کردن محدوده‌ها.

۶- بررسی روند صعودی تغییر دما در جریان‌ها و رفع آن با محدودتر کردن محدوده‌ها.

۷- تکرار مرحله‌های ۳ تا ۶ تا زمانی که تغییرها در محدوده‌ی آرایش دمایی خیلی کوچک شود.

۸- تغییر متغیرهای دمایی مستقل در محدوده‌ی مجاز با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی.

۹- مشخص کردن سطح، دماها و دبی‌های مبدل‌های با درجه‌ی آزادی صفر و جلوگیری از نقض حداقل تفاوت دما در مبدل‌های ارزیابی شده تا این که وضعیت کل شبکه مشخص شده، بتوانیم هزینه سرمایه‌گذاری در حالت‌های متفاوت توزیع مجاز بار را ارزیابی کنیم.

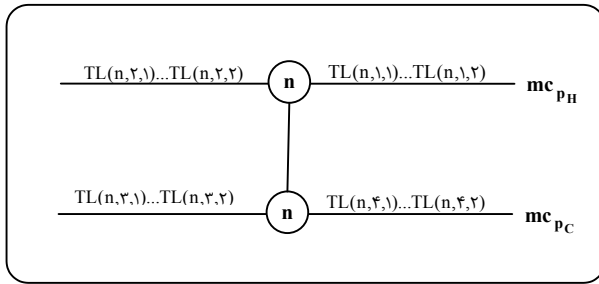
۱- مشخص کردن شبکه‌ی مبدل حرارتی

شبکه‌ی مبدل حرارتی را بر اساس ویژگی‌هایی چون ترتیب وجود مبدل‌ها در هر یک از جریان‌ها، تقسیم جریان‌ها، دماهای

(۱) Overall heat transfer coefficient (U)

(۲) Total Annual Cost

(۳) Air cooler



شکل ۲- محدوده‌های دمایی در مبدل.

۴- تعیین محدوده‌های دمایی هر یک از مبدل‌ها

محدوده‌های دمایی در هر یک از مبدل‌ها (شکل ۲)، محدوده‌هایی هستند که بر اساس آنها بار مبدل در محدوده مجاز تغییر می‌کند. این محدوده‌ها بیانگر حداقل و حداکثر هر یک از دماهای ورودی و خروجی، سمت لوله و پوسته‌ی مبدل است. محدوده‌های دمایی سمت راست که به لحاظ میانگین دمایی مقداری بالاتر از محدوده‌های دمایی سمت چپ دارند، محدوده بالادست و محدوده‌های سمت چپ را محدوده پایین‌دست می‌نامیم.

محدوده‌های دمایی هر مبدل که روی یک جریان قرار دارند، محدوده‌های مجاور و محدوده‌های بالادست یا پایین‌دستی هر مبدل که روی جریان‌های سرد و گرم قرار دارند، محدوده‌های مقابل می‌نامیم.

محدوده‌های دمایی اولیه بر اساس دمای ابتدا و انتهای جریان‌ها بدین صورت که در جریان‌های گرم، محدوده‌های پایین‌دست دمای انتهایی و محدوده‌های بالادست دمای ابتدایی را اختیار می‌کنند و در جریان‌های سرد برعکس جریان‌های گرم انتساب صورت می‌پذیرد.

محدوده حداقل و حداکثر بار مبدل‌ها

حداکثر بار طرف لوله یا پوسته یک مبدل ناشی از حداکثر تفاوت دمای ممکن با توجه به محدوده‌های دمایی مجاز است. این حداکثر مقدار نیز از تفاضل کران بالای محدوده‌ی دمایی بالادست از کران پایین محدوده‌ی دمایی پایین‌دست مجاور به‌دست می‌آید. هر سمت مبدل که حداکثر بار مجاز کمتری داشته باشد محدودیت حداکثر بار را معین می‌کند. لذا حداکثر بار مجاز یک مبدل، مطابق با رابطه‌ی (۴)، حداقل بارهای بیشینه‌ی طرف پوسته و لوله مبدل است.

در هیتر (یا کولر) با مشخص شدن دو متغیر از بین دمای ورودی و دمای خروجی جریان فرایندی به هیتر (یا کولر) و دبی سرویس گرم (یا سرد) و سطح انتقال حرارت هیتر (یا کولر)، وضعیت هیتر (یا کولر) مشخص می‌شود. لذا درجه‌ی آزادی مبدل‌های جدید ۳ و درجه‌ی آزادی مبدل‌های موجود و سرویس‌ها ۲ است.

ثابت بودن دمای جریان فرایندی ورودی به واحد تبادل‌کننده یا خروجی از واحد تبادل‌کننده حرارتی از درجه‌ی آزادی آن می‌کاهد. علت ثابت بودن دمای جریان فرایندی ورودی یا خروجی از واحدهای تبادل‌کننده حرارتی می‌تواند قرار گرفتن واحد در ابتدا یا انتهای جریان فرایندی و یا قرار گرفتن واحد در کنار واحد(های) با بار حرارتی ثابت که در ابتدا یا انتهای جریان فرایندی قرار گرفته‌اند) و یا محدودیت ویژه حاکم بر فرایند باشد.

با توجه به مسیرهای راهنمای بالا، وضعیت درجه آزادی واحدهای تبادل‌کننده حرارت را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا با انتخاب دمای ورودی و یا دمای خروجی جریان‌های فرایندی به مبدل‌ها به عنوان متغیر، درجه آزادی واحدهای تبادل حرارت موجود را به صفر سوق دهیم.

در انتخاب متغیرهای مستقل، ابتدا مبدل‌های با یک درجه‌ی آزادی و در صورت مشخص نشدن آرایش دمایی کل شبکه به انتخاب مبدل‌های با دو درجه آزادی روی می‌آوریم.

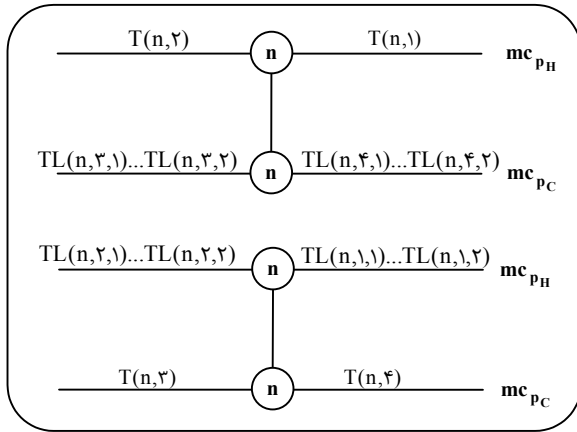
۳- ارزیابی واحدهای با درجه‌ی آزادی صفر

مبدل‌های با درجه‌ی آزادی صفر

با توجه به این که در مبدل‌ها دبی جریان سرد و گرم مشخص است، وضعیت مبدل با مشخص شدن ۳ متغیر از بین ۴ دمای مبدل مشخص می‌شود. در این حالت از روی ۳ دما و دبی‌ها، دمای چهارم را محاسبه و از رابطه‌ی (۱)، سطح انتقال حرارت را محاسبه می‌کنیم.

کولر (یا هیتر) با درجه‌ی آزادی صفر

با توجه به مشخص بودن دمای ورودی و خروجی جریان غیرفرایندی و دبی جریان فرایندی در هیتر (یا کولر)، بایستی از بین دمای ورودی و دمای خروجی جریان فرایندی گذرا از هیتر (یا کولر) جانبی و دبی سرویس جانبی، دو متغیر انتخاب کنیم. در این حالت با مشخص کردن دو دمای فرایندی، دبی سرویس (گرم یا سرد)، مشخص شده و با توجه به رابطه‌ی (۱)، سطح انتقال حرارت محاسبه خواهد شد.



شکل ۳- محدوده‌های دمایی در مبدل با بار معین.

$$\begin{aligned} mc_{pH} [T(n,1) - T(n,2)] &= mc_{pC} [TL(n,4,2) - TL(n,3,2)] \\ mc_{pH} [T(n,1) - T(n,2)] &= mc_{pC} [TL(n,4,1) - TL(n,3,1)] \end{aligned} \quad (6)$$

کران‌های بالایی محدوده‌های دمایی سمت سرد را کاهش و کران‌های پایینی را افزایش می‌دهیم تا رابطه‌های بالا بین کران‌ها برقرار شود. به عنوان مثال در رابطه‌ی بالا $TL(n,3,2)$ را ثابت فرض کرده و $TL(n,4,2)$ را محاسبه می‌کنیم. اگر $TL(n,4,2)$ جدید محاسبه شده از $TL(n,4,2)$ قبل از محاسبه، کوچکتر باشد، آن را پذیرفته و جایگزین $TL(n,4,2)$ می‌کنیم.

در مورد محدوده‌های پایینی نیز به صورت بالا عمل می‌کنیم ولی پذیرش TL محاسبه شده در صورت بزرگتر بودن TL از TL قبلی است. عملیات بالا را برای کران‌های دمایی باقی‌مانده نیز تکرار می‌کنیم.

بنابراین، با ثابت فرض کردن یکی از کران‌های دمایی به محاسبه کران دمایی مرتبط با آن می‌پردازیم. اگر کران دمایی مرتبط محدوده دمایی مربوط را کوچکتر کرد، آن را پذیرفته و گرنه برای کران‌های باقی‌مانده عملیات بالا را تکرار می‌کنیم.

۵- جلوگیری از نقض حداقل تفاوت دمای ممکن

در بهینه‌سازی توزیع بار مبدل‌ها، حداقل تفاوت دما را برابر یک قرار می‌دهیم تا به لحاظ این محدودیت، محدوده جستجوی نقطه بهینه وسیع‌تر شود. با برقراری این محدودیت، جریان‌های گرم وظیفه گرمایش و جریان‌های سرد وظیفه‌ی سرمایش را اجرا می‌کند. در تصحیح محدوده‌های دمایی برای رفع نقض حداقل تفاوت دمای ممکن، محدوده‌ها را به سمت کوچک شدن سوق می‌دهیم یعنی محدوده‌های پایینی را به سمت بالا و محدوده‌های

حداقل بار طرف لوله یا پوسته یک مبدل ناشی از حداقل تفاوت دمای ممکن با توجه به محدوده‌های دمایی مجاز می‌باشد. این حداقل مقدار نیز از تفاضل کران پایینی محدوده‌ی دمایی بالادست از کران بالایی محدوده‌ی دمایی پایین‌دست مجاور به دست می‌آید. هر سمت مبدل که حداقل بار مجاز بیشتری داشته باشد محدودیت حداقل بار را معین می‌کند. لذا حداقل بار مجاز یک مبدل، طبق رابطه (۵)، حداکثر بارهای کمینه‌ی طرف پوسته و لوله مبدل است.

$$Q_{\max} = \text{Min} [mc_{pH} (TL(n,1,2) - TL(n,2,1)) \quad (4)$$

$$mc_{pC} (TL(n,4,2) - TL(n,3,1))]$$

حداکثر بار مجاز مبدل مشخص می‌کند که تفاضل کران بالایی محدوده‌ی سمت راست مبدل و کران پایینی محدوده‌ی مجاور نمی‌تواند از یک مقدار معین بیشتر باشد.

$$Q_{\max} = \text{Min} [mc_{pH} (TL(n,1,1) - TL(n,2,2)) \quad (5)$$

$$mc_{pC} (TL(n,4,1) - TL(n,3,2))]$$

حداقل بار مجاز مبدل مشخص می‌کند که تفاضل کران پایینی محدوده بالادست و کران بالایی محدوده‌ی مجاور نمی‌تواند از یک مقدار معین کمتر باشد.

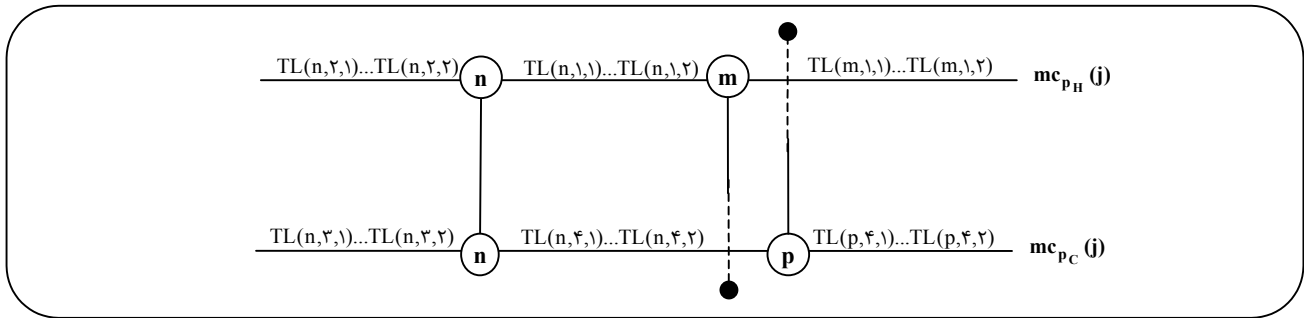
محدوده‌های دمایی در مبدل‌های با بار معین

دماهای سمت لوله یا پوسته مبدل می‌تواند به دلیل‌های زیر معین شود:

- الف - محدود شدن محدوده تغییر دما تا جایی که کران‌های بالا و پایینی آن محدوده یکی شود.
- ب - در مسیر بهینه‌سازی مقداری به متغیر انتساب شود.
- ج - مبدل در ابتدا یا انتهای جریان واقع شود.
- د - آرایش دمایی مبدل مجاور مشخص شده باشد.

مشخص شدن وضعیت دماهای مبدل روی یک جریان، مطابق شکل ۳، بار حرارتی آن را معین می‌کند. موازنه‌ی حرارتی محدوده‌های دمایی جریان مقابل را به نحوی تغییر می‌دهد که اختلاف کران‌های بالا و کران‌های پایینی برابر با تفاوت دمایی است که بار حرارتی مبدل بر آن جریان ایجاد می‌کند.

به عنوان مثال، اگر محدوده‌های دمایی گرم بنا به یکی از دلیل‌های ذکر شده مشخص شده باشد، بین کران‌های محدوده‌های دمایی بالادست و پایین‌دست جریان سرد باید رابطه‌های (۶) برقرار باشد.



شکل ۴- جزئی از شبکه که مبدل‌های m و n روی جریان گرم و مبدل‌های n و p روی جریان سرد همسایه‌اند.

به عنوان مثال، در شبکه‌ی شکل ۴، که جزئی از یک شبکه مبدل‌های حرارتی است، با توجه به این که مبدل‌های n و m روی جریان گرم i و مبدل‌های n و p روی جریان سرد j همسایه هستند، لذا رابطه‌های (۸) به عنوان رابطه‌های همسایگی بین حدهای مبدل‌های n ، m ، p و n برقرار است.

$$\begin{aligned} TL(m,2,j) &= TL(n,1,j) & j &= 0,1 & (8) \\ TL(n,4,j) &= TL(p,3,j) & j &= 0,1 \end{aligned}$$

برای برقراری روند صعودی دما در جریان‌های i و j باید رابطه‌های (۹) بین حدهای دمایی مبدل‌های واقع روی این جریان برقرار باشد:

$$\begin{aligned} TL(n,2,j) &< TL(n,1,j) < TL(m,1,j) & j &= 0,1 & (9) \\ TL(n,3,j) &< TL(n,4,j) < TL(p,4,j) & j &= 0,1 \end{aligned}$$

در نظر گرفتن مجموعه رابطه‌های بالا با یکدیگر بیانگر این است که در تمامی مبدل‌های موجود در شبکه باید همزمان رابطه‌ی صعودی بین محدوده‌های مجاور در هر مبدل برقرار باشد.

در شبکه‌ی شکل ۴، رابطه‌های برقرار کننده رابطه‌ی صعودی بین دماهای مبدل n ام به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} TL(n,2,j) &< TL(n,1,j) & j &= 0,1 & (10) \\ TL(n,3,j) &< TL(n,4,j) & j &= 0,1 \end{aligned}$$

در اینجا نیز حدهای بالا و پایین را در جهتی تغییر می‌دهیم که محدوده‌ها به سمت کوچکتر شدن پیش روند. به عنوان مثال، اگر در شبکه شکل ۴، $TL(n,2,1) > TL(n,1,1)$ باشد، مقدار $TL(n,1,1)$ را با $TL(n,2,1)$ جایگزین می‌کنیم که منجر به کوچکتر شدن محدوده اول $[TL(n,1,1)...TL(n,1,2)]$ خواهد شد.

بالا را به سمت پایین سوق می‌دهیم تا رابطه‌های بالا برقرار باشد. به عنوان مثال در شکل ۲، رابطه‌های (۷) بایستی بین محدوده‌های دمایی برقرار باشد:

$$\begin{aligned} TL(n,2,j) - TL(n,3,j) &> DT_{min} & j &= 0,1 & (7) \\ TL(n,1,j) - TL(n,4,j) &> DT_{min} & j &= 0,1 \end{aligned}$$

در اینجا نیز با ثابت فرض کردن یک مرز، مرز دیگر را محاسبه می‌کنیم. اگر مرز محاسبه شده نسبت به مرز قبلی، محدوده را کوچکتر کرد، آنرا پذیرفته و سراغ حدود باقی‌مانده می‌رویم وگرنه با عدم پذیرش مرز محاسبه شده، همین عمل را برای حدود باقی‌مانده تکرار می‌کنیم.

۶- برقراری روند صعودی و نزولی تغییر دما در مبدل‌ها

روند صعودی یا نزولی تغییر دما بر این نکته تاکید دارد که در جریان‌های گرم دما کاهش و در جریان‌های سرد دما افزایش می‌یابد که بیان کننده انتقال حرارت از منبع گرم به منبع سرد است. برای برقراری این امر، کران‌های بالا و پایین محدوده‌های بالادست باید بزرگتر یا مساوی کران‌های متناظر از محدوده پایین‌دست مجاور باشند.

عدم برقراری روند صعودی یا نزولی دما باعث افزایش تبادل حرارت و افزایش تعداد مبدل‌ها می‌شود. به دلیل اینکه جریان‌های گرم (یا سرد) در عوض سرد (یا گرم) شدن، گرم (یا سرد) می‌شوند لذا باید میدلی اضافه به کار رود، تا وضعیت جریان را به قبل از انتقال حرارت معکوس برگرداند. در نتیجه انتقال حرارت معکوس موجب ایجاد دو خطا می‌شود که خطای اول اضافه شدن سطح به جهت انتقال حرارت معکوس است و خطای دوم اضافه شدن سطح به جهت برگرداندن شبکه به وضعیتی ماقبل از انتقال حرارت معکوس است.

دمای متوسط لگاریتمی و بار حرارتی هر یک از مبدل‌ها مشخص خواهد شد. سطح هر یک از مبدل‌ها نیز از رابطه‌ی کلی انتقال حرارت محاسبه می‌شود.

در طراحی جدید هزینه‌ی سرمایه‌گذاری هر یک از مبدل‌ها از روی تابع هزینه‌ی مبدل که متشکل از دو قسمت هزینه‌ی نصب و هزینه‌ی سطح است، قابل محاسبه است. هزینه‌ی سرویس‌های مصرفی نیز با توجه به قیمت انرژی قابل ارزیابی است. با توجه به ثابت بودن افت فشار مبدل‌ها، هزینه‌ی پمپ و کمپرسور ثابت باقی خواهد ماند. لذا تابع هدف بهینه‌سازی، طبق رابطه (۱۱) مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری در قسمت مبدل‌ها و سرویس‌ها است.

$$T.A.C. = \sum_{i=1}^n \left[NS_i \times \left[a_i + b_i \times \left(\frac{A_i}{NS_i} \right)^{c_i} \right] \right] + \sum_1 (d_1 \times Q_1) \quad (11)$$

اندیس i بیانگر مبدل و اندیس ۱ بیانگر سرویس‌های جانبی است. با مشخص شدن آرایش دمایی مبدل از رابطه‌ی بی، NS_i قابل محاسبه است [۳].

در طراحی اصلاحی، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مبدل‌های جدید از رابطه‌ی (۱۲) قابل محاسبه است.

$$A.C. = \sum_i NS_i \times \left[a_i + b_i \times \left(\frac{A_i}{NS_i} \right)^{c_i} \right] \quad (12)$$

میزان ذخیره انرژی طبق رابطه‌ی (۱۳) برابر میزان کاهش مصرف سرویس‌های گرم و سردکننده‌های هوایی می‌باشد.

$$E.S. = \sum_1 d_1^{Aft.} \times Q_1^{Aft.} - d_1^{Bef.} \times Q_1^{Bef.} \quad (13)$$

همچنین دوره بازگشت از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$Payback = A.C. / E.S. \quad (14)$$

در صورت برقراری محدودیت بهینه‌سازی (ثابت بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری یا دوره بازگشت سرمایه)، پذیرش آرایش دمایی جدید منوط به کاهش دوره بازگشت در هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ثابت یا افزایش ذخیره انرژی در دوره بازگشت است.

با تغییر بار مبدل‌ها (در نظر گرفتن آرایش‌های دمایی متفاوت)، کمترین میزان هزینه‌ی سرمایه‌گذاری را به دست می‌آوریم.

الگوریتم‌ها

الگوریتم کلی حاکم بر بهینه‌سازی توزیع بار به صورت شکل ۵ است که شامل سه مرحله می‌باشد:

۷- کوچک کردن بازه تغییر متغیرها تا حد ممکن

با تکرار مرحله‌های ۳ تا ۶ تا جایی که تغییرها در بازه‌های دمایی مبدل‌ها کوچک شود، در حقیقت دامنه جستجوی پاسخ بهینه را کوچک‌تر و به عبارت دیگر نقاطی که باعث ایجاد نقض در هم‌خوانی اطلاعات می‌شود، را حذف می‌کنیم. البته این بدین معنا نیست که تمامی نقاطی که شرایط مرزی را رعایت نمی‌کنند، حذف می‌شوند. چون مرحله‌های ۳ تا ۶، تنها نقاط مرزی را از مدار جستجو خارج می‌سازد. با کوچکتر شدن بازه‌ها شرایط برای رسیدن سریع به جواب بهینه فراهم می‌شود.

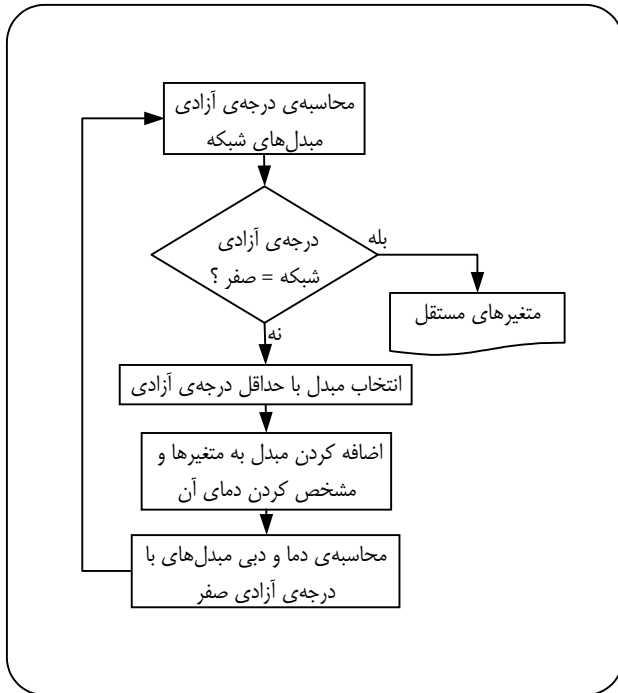
۸- مقدار دهی به متغیرهای مستقل در محدوده‌ی مجاز

با مشخص شدن محدوده‌ی دمایی به کمک مرحله‌های بالا، شروع به مقداردهی به هر یک از متغیرها مطابق شرایط اولیه بهینه‌سازی با روش جستجوی مستقیم نلدر-مید [۲] در محدوده مجاز کرده، به طوری که در شبکه تکمیل شده، هیچ‌گونه نقضی اعم از نقض DT_{min} و عدم هم‌خوانی دماهای محاسبه شده با یکدیگر وجود نداشته باشد. آنگاه ادامه جستجوی نقطه بهینه را به این روش واگذار کرده، به طوری که محدودیت‌های یادآوری شده‌ی بالا را رعایت کند.

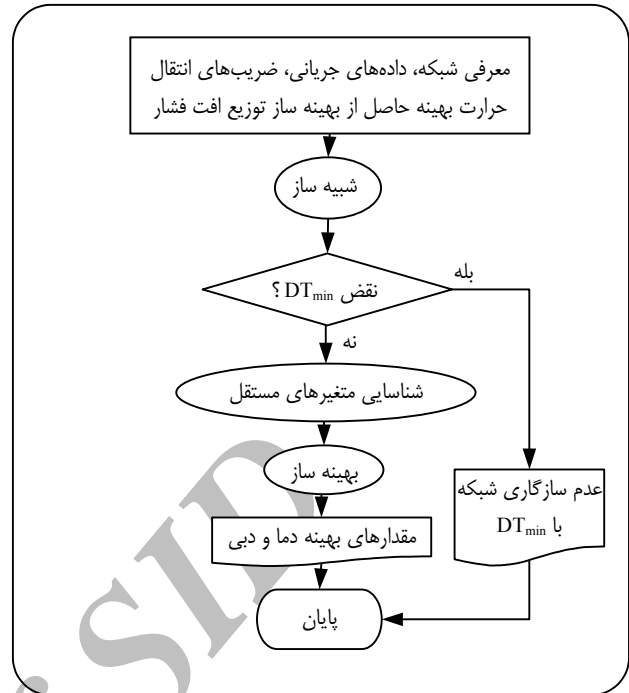
توجه به این امر ضروری است که باید پس از مشخص شدن هر یک از دماها، شبکه را از لحاظ این که روند صعودی یا نزولی بودن دما و حداقل تفاوت دمای قابل دسترس را نقض نکرده باشد بررسی کنیم. در صورت مثبت بودن نتیجه، محدوده‌های بعدی را برای دسترسی به جواب بهینه بررسی می‌کنیم و گرنه محدوده‌ی باقی‌مانده از محدوده‌ی موجود را بررسی می‌کنیم و در صورتی که در این محدوده نیز شبکه‌ای عملی (شبکه‌ای که نقض حداقل تفاوت دما در آن نباشد) ایجاد نشود، بایستی در محدوده‌های قبلی نقاط عملی را جستجو کنیم.

۹- شبکه با ضریب انتقال حرارت مفروض

ضریب انتقال حرارتی که از بهینه‌سازی توزیع افت فشار، به دست می‌آید را به عنوان مقدارهای مفروض در بهینه‌سازی توزیع بار استفاده می‌کنیم. با ثابت شدن اندازه ضریب‌های انتقال حرارت سمت گرم و سرد هر مبدل، ضریب انتقال حرارت کلی هر مبدل ثابت می‌شود. همچنین با توجه به مشخص شدن آرایش دمایی در هر مرحله‌ی مسیر بهینه‌سازی و مشخص بودن دبی و گرمای ویژه‌ی جریان‌های ورودی به هر یک از مبدل‌ها، تفاوت



شکل ۶- الگوریتم شناساگر متغیرها.



شکل ۵- الگوریتم کلی بهینه‌سازی بار.

هزینه‌ی کل سرمایه‌گذاری را می‌دهد که روند بهینه‌سازی در جهت کاهش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری است. با استخراج اطلاعات اقتصادی از جدول ۱، نتیجه‌های حاصل از بهینه‌سازی توزیع بار در شبکه آروماتیک مطابق جدول ۲ به دست می‌آید (شکل ۱۰). شبکه مورد مطالعه در طراحی اصلاحی (شکل ۱۱)، ابتدا توسط پنجه‌شاهی [۷] با افت فشارهای ثابت طراحی شد و سپس بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها توسط فالاحی [۸]، انجام و شبکه بر اساس افت فشارهای بهینه شده، اصلاح شده است. همچنین اطلاعات اقتصادی نیز در جدول ۱ خلاصه شده است. مشخصات مبدل‌های حرارتی موجود در جدول ۳ آورده شده است و نتیجه‌های بهینه‌سازی بار در جدول ۴ و مقدارهای بهینه بارحرارتی در شبکه‌ی شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

مقایسه‌ی توزیع بهینه بار و شکستن حلقه

حذف حلقه و برطرف کردن نقض دمایی به وسیله‌ی مسیر در واقع حالت ویژه‌ای از توزیع بهینه‌ی بار است که تنها نقاط حدی را پوشش می‌دهد [۹]. بدیهی است که با حذف یک مبدل از مبدل‌های موجود در شبکه یک درجه از درجه‌ی آزادی سیستم کاسته می‌شود و روند بهینه‌سازی با یک متغیر کمتر روبرو خواهیم بود.

الف - شبیه‌سازی

مشخص‌کننده محدودده‌های دمایی هر یک از مبدل‌ها و حل کردن تک تک واحدهای فرایندی (مبدل، هیتر، کولر، جداکننده و مخلوط‌کننده) زمانی که درجه‌ی آزادی آنها صفر شود و شناسایی نقض‌های دمایی احتمالی (شکل ۷).

ب - شناساگر متغیرها

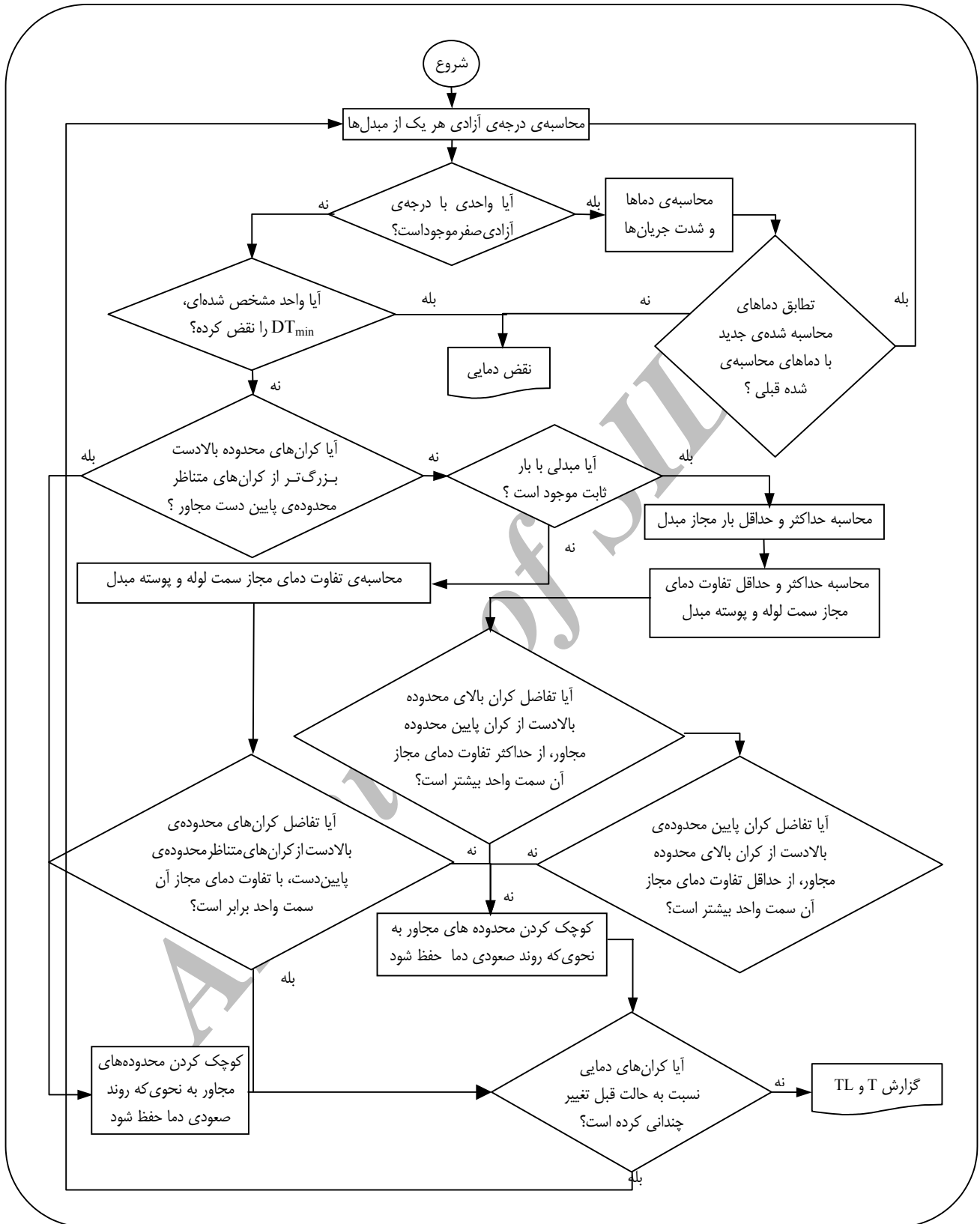
شناسایی متغیرها با توجه به درجه‌ی آزادی مبدل‌ها (شکل ۶).

ج - بهینه‌سازی

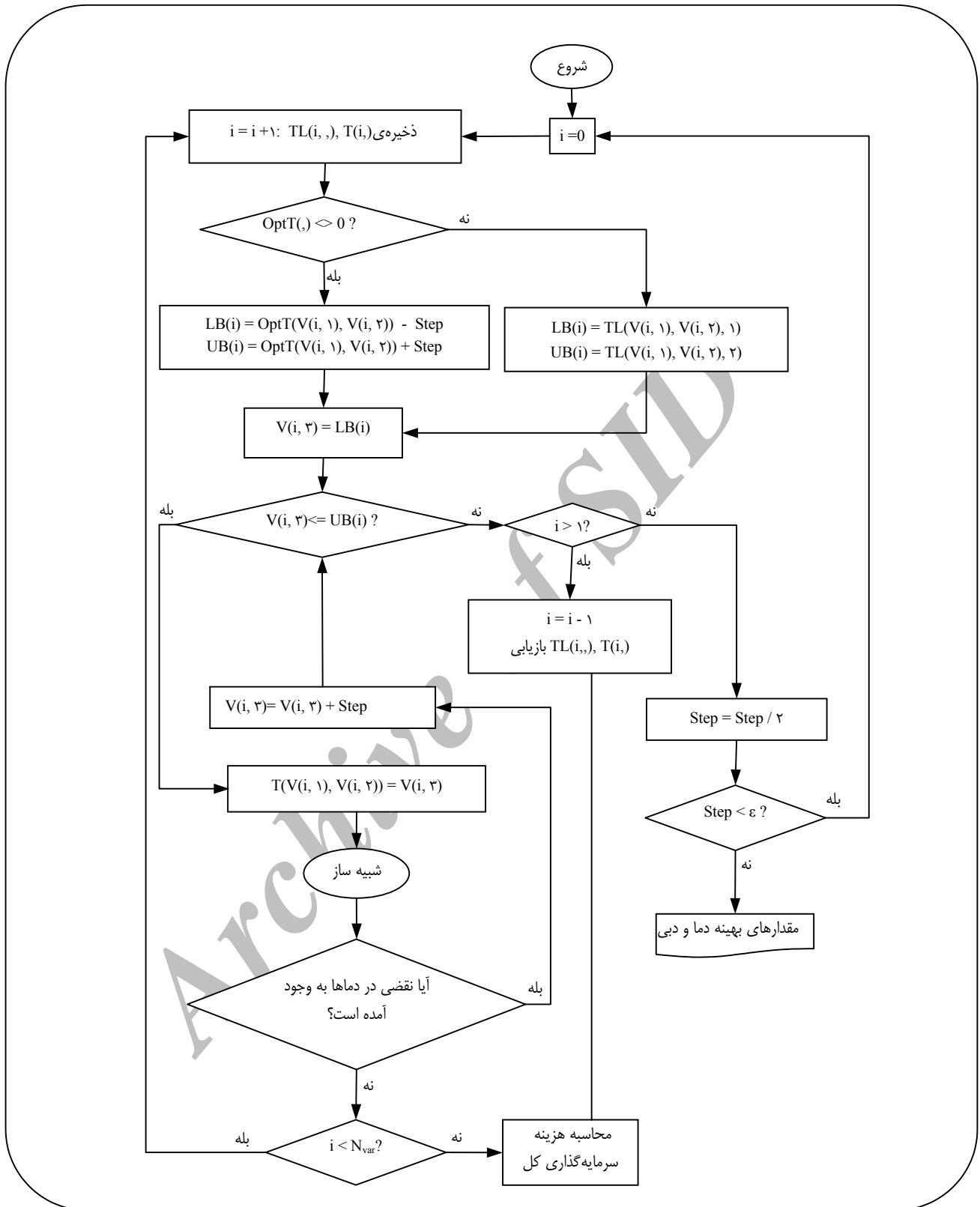
یافتن توزیع بهینه بار با انتخاب روش ریاضی مناسب [۲ و ۴] برای تعیین هر یک از متغیرها در محدوده‌ی مجاز (شکل ۸).

مسئله نمونه

طراحی جدید مورد بررسی مطابق شکل ۹، مجتمع آروماتیک است که برای نخستین بار در سال ۱۹۸۲ میلادی عنوان شد [۵] و بعد از آن توسط Ahmad و Linnhoff [۶]، ساده‌سازی شد تا قابلیت تکنولوژی پینچ در رابطه‌ی با سنتر شبکه‌های بهینه نشان داده شود. هزینه‌ی مبدل‌ها (هزینه‌ی نصب و سطح انتقال حرارت) و هزینه‌ی پمپ و کمپرسور به اضافه‌ی هزینه‌ی سرویس‌های مصرفی،



شکل ۷ - الگوریتم شبیه‌ساز.



شکل ۸ - الگوریتم بهینه‌ساز.

جدول ۱- اطلاعات اقتصادی فرایند.

هزینه‌ی منبع گرم: ۷۰ £/KW.yr	عمر مفید واحد (N): ۵ سال
هزینه‌ی منبع سرد: ۷ £/KW.yr	نرخ تورم (i): ۱۵ درصد
هزینه‌ی برق مصرفی: ۳۶۰ £/KW.yr	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سطح: $700 (A)^{1/3}$
سقف سرمایه‌گذاری: ۲,۰۰۰,۰۰۰ £	حداکثر دوره بازگشت: ۱/۵ سال
هزینه‌ی سرمایه‌گذاری پمپ: $(q\sqrt{h})^{1/2}$ با بازدهی هیدرولیکی ۷۰ درصد	

جدول ۲- نتیجه‌های به دست آمده از بهینه‌سازی بار.

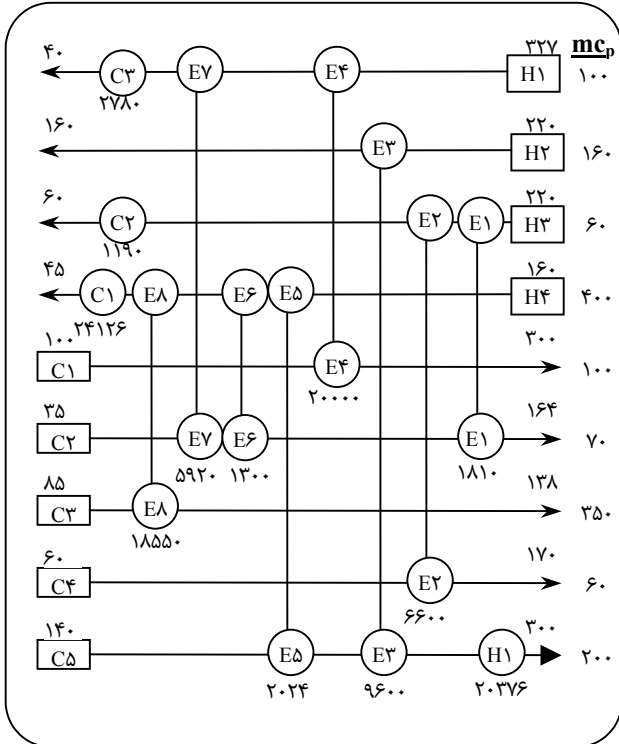
وضعیت شبکه	طراحی اولیه	نتیجه‌های SPRINT	بهینه‌سازی توزیع بار	اختلاف (درصد)
انرژی (مگاوات)	۲۱/۶۸	۲۰/۵۲	۲۰/۳۸	-۰/۶۸
سطح شبکه (مترمربع)	۱۰۴۲۹	۷۳۹۲	۷۳۵۲	-۰/۵۴
تعداد واحدها	۱۴	۱۲	۱۲	واحد
تعداد پوسته‌ها	۳۶	۴۰	۴۵	۵ پوسته
هزینه‌ی انرژی (پونددرسال)	۱۷۲۳۴۰۲	۱۶۳۳۶۹۷	۱۶۲۳۰۰۸/۴	-۰/۶۵
هزینه‌ی سطح (پونددرسال)	۸۶۳۸۰۶/۳	۸۷۴۴۸۷/۶	۸۴۳۴۰۴/۷	-۰/۹۳
هزینه کل (پونددرسال)	۲۵۸۷۲۰۸	۲۵۰۸۵۶۸	۲۵۰۴۶۳۷	-۰/۷۳

جدول ۳- ویژگی‌های مبدل‌های موجود واحد پیش گرم نفت خام.

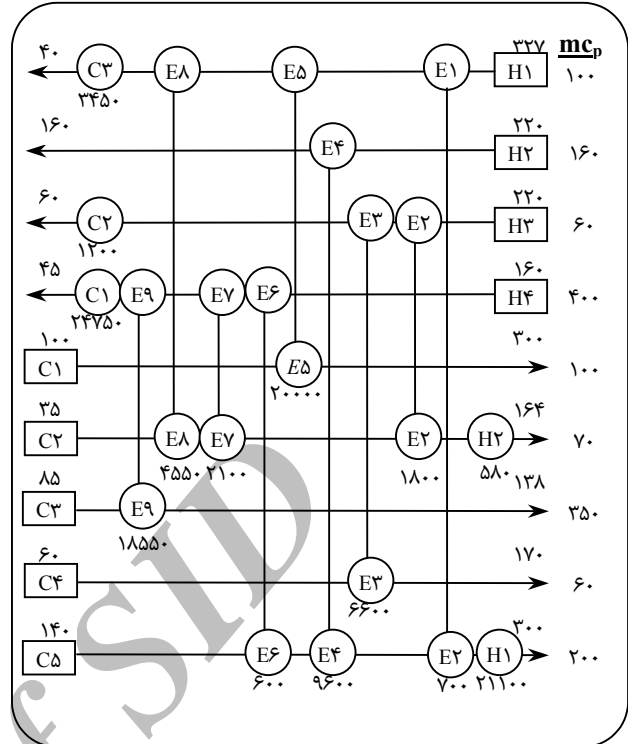
ویژگی	E۱	E۲	E۳	E۴	E۵	E۶
طرف لوله	Kero.	Naph.	HGO	LGO	BPA	ATB
طرف پوسته	Crude	Crude	Crude	Crude	Crude	Crude
سطح (m ²)	۲۸۰	۱۴۸۰	۲۸۰	۸۰۰	۲۷۶۰	۱۳۶۰
سری × موازی	۱×۱	۱×۱	۱×۱	۱×۲	۲×۳	۱×۴
قطر داخلی پوسته (mm)	۹۴۰	۱۵۴۲	۹۴۰	۱۱۴۳	۱۲۱۹	۱۱۴۳
فاصله بافل (mm)	۲۵۵/۳	۱۲۴۶/۴	۱۹۷/۳	۴۱۹/۳	۶۰۵/۱	۵۰۹/۱
تعداد لوله	۱۰۷۵	۲۸۲۷	۱۰۷۵	۱۵۹۰	۱۸۱۰	۱۵۹۰
تعداد عبور	۲	۲	۲	۲	۲	۲
قطر داخلی لوله (mm)	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴	۱۵/۴
قطر خارجی لوله (mm)	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱	۱۹/۱
فاصله گام لوله (mm)	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴	۲۵/۴

جدول ۴- نتیجه‌های به دست آمده از بهینه‌سازی بار.

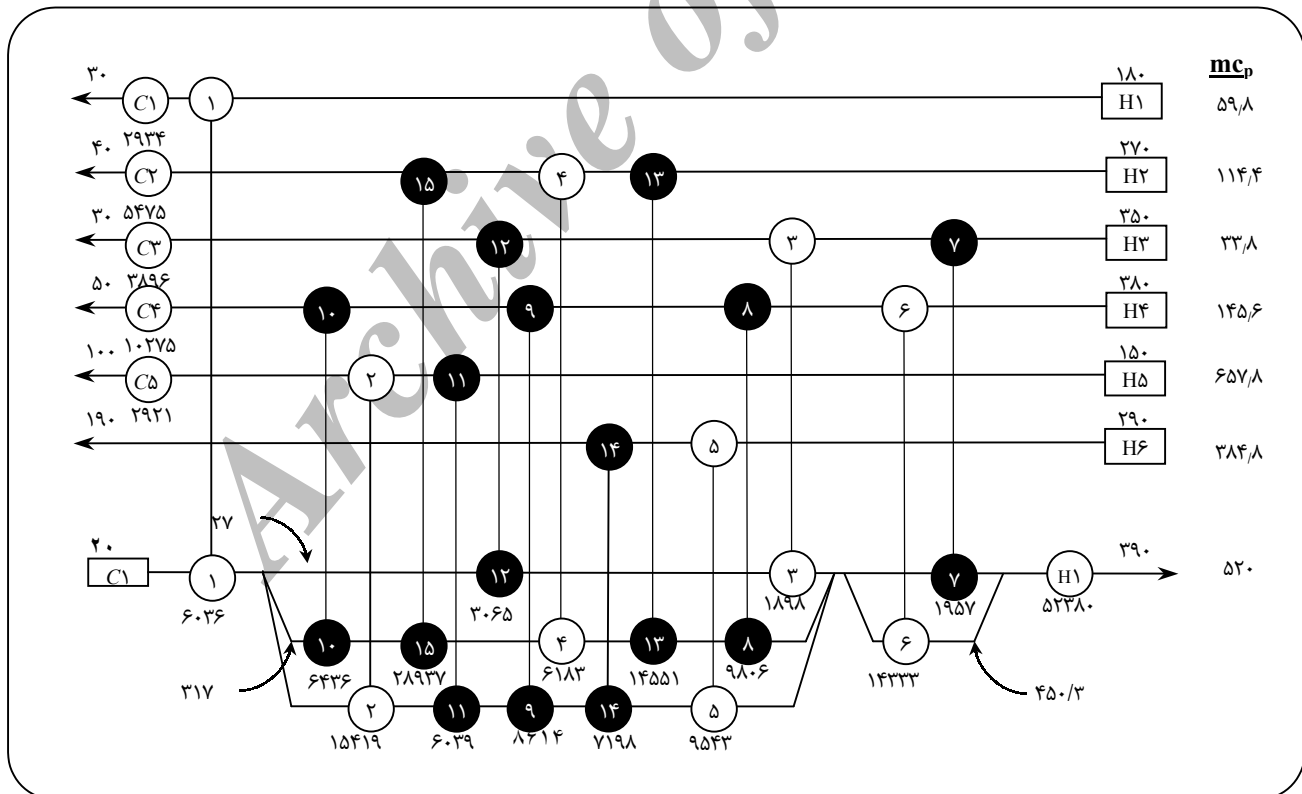
وضعیت شبکه	انرژی (مگاوات)	سطح شبکه (مترمربع)	تعداد واحدها	تعداد پوسته‌ها	هزینه‌ی انرژی (پونددرسال)	هزینه‌ی سطح (پونددرسال)	دوره بازگشت (سال)	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (پوند)
طراحی اولیه	۵۳۲۸۵	۷۹۵۸	۲۱	۴۶	۳۷۲۹۹۰۸	۱۹۹۵۷۵۶	۱/۳۰۱	۲۱۲۹۴۶۴
بهینه‌سازی توزیع بار	۵۳۲۸۰	۷۴۳۱	۲۱	۴۰	۳۶۶۶۵۷۲	۱۸۴۰۱۶۵	۱/۱۶۱	۱۹۹۰۰۰۱
درصد بهبود	۱/۷	۶/۶			۱/۷	۷/۸	۱۰/۸	۶/۵



شکل ۱۰- شبکه‌ی سنتز بعد از توزیع بهینه‌ی بار (بار حرارتی: KW).



شکل ۹- شبکه‌ی سنتز قبل از توزیع بهینه‌ی بار (بار حرارتی: KW).



شکل ۱۱- شبکه‌ی بهینه‌ی توزیع بار واحد پیش گرم‌زفت‌خام (بار حرارتی: KW).

نتیجه‌گیری نهایی

الف - بهینه‌سازی توزیع بار با پوشش دادن تمام محدوده‌ای که مبدل‌ها می‌توانند در آن محدوده تغییر بار دهند، یعنی از حداقل بار مجاز مبدل تا حداکثر بار مجاز مبدل، نتیجه‌های بهتری نسبت به شکستن حلقه‌ها و ایجاد مسیر در صورت ایجاد نقض دمایی ارایه می‌دهد.

ب - در بهینه‌سازی توزیع بار می‌توان حداقل دماهای قابل پذیرش متفاوت را مورد بررسی قرار داد، لذا تمامی مبدل‌ها می‌توانند از این فرصت استفاده کنند. در صورتی که در شکستن حلقه، این امکان فقط برای مبدلی که دچار نقض دمایی شده است، وجود دارد.

ج - شبکه بهینه‌ی نهایی حاصل از شکستن حلقه‌ها و ایجاد مسیر وابسته به توزیع بار در شبکه‌ی اولیه است اما شبکه‌ی بهینه حاصل از توزیع بهینه بار به توزیع بار در شبکه‌ی اولیه وابسته نیست.

د - در بهینه‌سازی توزیع بار با شناسایی متغیرهای مسأله و تغییر آن در بازه مناسب با انتخاب روش بهینه‌سازی مناسب به جواب می‌رسیم، در صورتی که در بهینه‌سازی با شکستن حلقه‌ها در هر مرحله بایستی حلقه‌های موجود را شناسایی و مسیرهای متفاوتی که از مبدل نقض کننده دمایی می‌گذرد را پیدا کنیم تا بتوانیم از بین آنها بهترین ترکیب را پیدا کنیم.

ارایه نتیجه‌های بهتر و نزدیک به نتیجه‌های نرم‌افزار SPRINT، بیانگر قوت روش بهینه‌سازی بار ارایه شده به عنوان زیر مجموعه‌ای از الگوریتم کلی بهینه‌سازی جامع شبکه‌های مبدل حرارتی است.

فهرست علائم

i	شماره مبدل
j	جریان گرم گذرا از مبدل
k	جریان سرد گذرا از مبدل
l	سرویس‌های گرم و سرد کننده هوایی
T_{ij}	دمای جریان گرم ز ورودی به مبدل i
$T_{ij+\lambda}$	دمای جریان گرم ز خروجی از مبدل i
m_{ij}	دبی جریان گرم گذرا از مبدل i
m_{ik}	دبی جریان سرد گذرا از مبدل i

بنابراین، یک فرصت از فرصت‌های موجود برای بهینه‌سازی را از دست می‌دهیم. البته در موردهایی ممکن است حذف حلقه و توزیع بهینه بار نتیجه‌های یکسانی را ارایه کنند.

در نظر نگرفتن توانایی انتقال جزئی بار در مبدل‌های تشکیل دهنده حلقه و پذیرفتن یا نپذیرفتن حذف یک مبدل در حلقه به دلیل کاهش یا افزایش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالیانه می‌تواند ما را در روند بهینه‌سازی در مسیری قرار دهد که از رسیدن به نقطه بهینه جهانی محروم سازد.

مقایسه‌ی نتیجه‌های توزیع بهینه بار و نرم افزار SPRINT^(۱)

مقایسه‌ی بین نرم افزار SPRINT و بهینه‌ساز توزیع بار بیانگر نکات زیر است:

الف - روش‌های به کار رفته در این تحقیق به طور کامل با روش‌های SPRINT متفاوت است. در SPRINT بار مبدل‌ها در راستای حلقه‌ها و مسیرها جابه‌جا می‌شود.

ب - نرم افزار SPRINT فقط در اختیار اعضای کنسرسیوم^(۲) است و قابل دسترس نیست.

ج - نتیجه‌های به دست آمده از این تحقیق با نتیجه‌های SPRINT [۷]، تطابق خوبی دارد و حتی در موردهایی مناسب‌تر هم می‌باشد.

د - روش‌های به کار رفته در این تحقیق به گونه‌ای است که بستر مناسبی را برای سوار کردن الگوریتم‌های افت فشار فراهم می‌آورد.
ه - انجام این کار مقدمه‌ای برای بهینه‌سازی افت فشار و بهینه‌سازی نسبت تقسیم جریان است. بنابراین، انجام این تحقیق ضروری به نظر می‌رسید.

مقایسه‌ی بین عملیاتی که در حذف حلقه و توزیع بهینه بار روی مبدل‌ها انجام می‌شود ما را به این نکته رهنمون می‌سازد که حذف حلقه و برطرف کردن نقض دمایی به وسیله‌ی مسیر در واقع حالت ویژه‌ای از توزیع بهینه بار است که تنها نقاط حدی را پوشش می‌دهد.

بدیهی است که با حذف یک مبدل از مبدل‌های موجود در شبکه یک درجه از درجه‌ی آزادی سیستم کاسته می‌شود و در روند بهینه‌سازی با یک متغیر کمتر روبرو خواهیم بود. بنابراین، یک فرصت از فرصت‌های موجود برای بهینه‌سازی را از دست می‌دهیم. البته در موردهایی ممکن است حذف حلقه و توزیع بهینه بار نتیجه‌های یکسانی را ارایه کنند.

(۱) http://cpi.umist.ac.uk/Software/products/Spr_hlp/spr_optimise_net.htm

(۲) <http://cpi.umist.ac.uk/consortium/>

b_i	ضریب هزینه‌ی سطح مبدل i	R_{ij}	مقاومت حرارتی رسوب بر جریان گرم
c_i	توان هزینه‌ی سطح مبدل i	h_{ij}	ضریب انتقال حرارت فیلمی جریان j در مبدل i
d_l	قیمت واحد حجم سرویس جانبی l	Q_i	بار حرارتی مبدل i
Q_j	دبی حجمی سرویس جانبی l	U_i	ضریب انتقال حرارت کلی مبدل i در حالت رسوب گرفته
DT_{min}	حداقل تفاوت دمای مجاز دو سمت مبدل	A_i	سطح انتقال حرارت مبدل i
A.C.	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مبدل‌های جدید	F_{Ti}	ضریب تصحیح سطح انتقال حرارت مبدل i
E.S.	سود حاصل از ذخیره انرژی	$c_{p,ij}$	گرمای ویژه جریان گرم عبوری از مبدل i
Payback	دوره بازگشت	$c_{p,ij}$	گرمای ویژه جریان سرد عبوری از مبدل i
		LMTD $_i$	تفاوت دمای متوسط لگاریتمی مبدل i
		NS $_i$	تعداد پوسته‌های مبدل i
		a_i	هزینه‌ی نصب مبدل i

تاریخ دریافت: ۱۳۷۶/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۷۶/۵/۳

مراجع

[۱] پنجه‌شاهی، محمدحسن؛ علی مندگاری، علی؛ فلاحی، حمیدرضا؛ رضایی دیزجیکان، هادی؛ توزیع بهینه افت فشار در شبکه‌های مبدل حرارتی طراحی شده با PDM، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۲۴، شماره ۲، صص ۱-۸ (۱۳۸۴).

- [2] Nelder, J.A., Mead R., A Simplex Method for Function Minimization, *Computer journal*, 7, P.308 (1965).
- [3] Bell, K.J., Final Report of the Cooperative Research Program on Shell & Tube Heat Exchangers, Bulletin No.5, University of Delaware Engineering Experiment Station, Newark, Delaware, (1963).
- [4] Rao, S.S., "Optimization: Theory and Applications", 2nd Edition, New Delhi, New Age International (p) Limited, Publishers, p. 292 (1984).
- [5] Linnhoff, B., et al., User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, *ICHEME*, Rugby (1982).
- [6] Linnhoff, B., Ahmad, S., Optimal Synthesis of Energy Management Systems., *TASME, J. Eng. Res. Tech.*, 111(3), p. 121 (1989).
- [7] Panjeshahi, M.H., Pressure Drop Consideration in Process Integration., PhD Thesis, UMIST, Department of Chemical Engineering, U.K. (1992).

[۸] فلاحی، حمیدرضا، "بهینه‌سازی افت فشار در انتگراسیون فرایند" پایان نامه دکترا، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی (۱۳۷۸).

- [9] Jezowski, J., Bochenek, R., Jezowska, A., Loop Breaking in Heat Exchanger Networks by Mathematical Programming, *App. Thermal Eng.*, 21, P.1429 (2001).