

توزیع بهینه افت فشار در شبکه‌های مبدل حرارتی طراحی شده با PDM

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

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۳۶۵

چکیده: بهینه‌سازی، سومین مرحله در طراحی شبکه‌های مبدل حرارتی به روش پینچ است. شبکه‌هایی که پارامتر افت فشار در آنها لحاظ شده و بهینه‌سازی افت فشار جریان و توزیع افت فشار جریان بین مبدل‌ها به نحوی که منجر به هزینه سالانه کمینه شود، هدف اصلی این مقاله است. افت فشار سمت لوله و پوسته مبدل بر ضریب‌های انتقال حرارت و سطح مبدل تأثیر می‌گذارند و می‌توان با تغییر افت فشار دو سمت مبدل، سطح جدیدی را برای بار حرارتی یکسان محاسبه کرد و افت فشار روی مبدل‌ها را تغییر داد به نحوی که هزینه سالانه کمینه شود. سه روش برای بهینه‌سازی افت فشار ارائه شده است که دو روش بر اساس توزیع افت فشار جریان روی مبدل‌ها و روش سوم بر اساس استفاده از روش ریاضی بهینه‌سازی (سیمپلکس) است. در نهایت بهترین روش برای توزیع افت فشار مبدل‌ها انتخاب شده و شبکه مفروض با روش انتخاب شده از نظر افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها بهینه‌سازی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتگراسیون فرایند، آنالیز پینچ، شبکه‌های مبدل حرارتی، افت فشار، بهینه‌سازی.

KEY WORDS: Process integration, Pinch analysis, Heat exchanger networks, Pressure drop, Optimization.

مقدمه

تغییر هزینه سرمایه‌گذاری با تغییر افت فشار ما را به نقطه بهینه رهنمون خواهد ساخت. در بهینه‌سازی شبکه‌ای با شرایط ذکر شده، سه حالت ضریب انتقال حرارت ثابت و افت فشار ثابت و افت فشار متغیر برای هر یک از جریان‌ها قابل تصور است. در حالت اول افت فشار درون لوله و پوسته متناسب با سطح تغییر خواهد کرد، لذا هزینه سرمایه‌گذاری تنها از سطح مبدل‌ها تأثیر می‌پذیرد. به عبارت دیگر اثر افت فشار مبدل در سطح انتقال حرارت آن هضم می‌شود. در حالت دوم افت فشار و سطح مبدل‌ها مجاز به تغییر خواهند بود اما مجموع افت فشار مبدل‌ها روی هر جریان باید مقدار ثابت

معادله کلی انتقال حرارت، برقرار کننده رابطه‌ای بین بار مبدل و سطح انتقال دهنده حرارت و چهار دمای ورودی و خروجی به مبدل و ضریب کلی انتقال حرارت است. با توجه به این که ضریب‌های انتقال حرارت در سمت لوله و پوسته مبدل از افت فشار سمت لوله و پوسته و سطح انتقال حرارت تأثیر می‌پذیرند، لذا پارامتر افت فشار افزون بر سطح انتقال حرارت به عنوان یکی از پارامترهای موثر در میزان هزینه سرمایه‌گذاری مطرح می‌شود. در شرایط ثابت بودن بار مبدل‌ها و نسبت تقسیم جریان، افزایش افت فشار مبدل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت، کاهش سطح مبدل‌ها (کاهش هزینه سرمایه‌گذاری) و افزایش توان پمپ و کمپرسور (افزایش هزینه سرمایه‌گذاری) می‌شود. لذا

*عهده دار مکاتبات

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

حالت‌های متفاوت توزیع افت فشار

طراحی شبکه با استفاده از ضریب‌های انتقال حرارتی انجام می‌شود که در مرحله هدف‌گذاری به‌دست می‌آیند. ضریب‌های انتقال حرارتی که در شبکه‌های با ملاحظه افت فشار استفاده می‌شوند از ضریب‌های انتقال حرارت ثابت نتیجه‌ی بهتری دارند، ولی در مرحله طراحی استفاده از ضریب‌های انتقال حرارت یکسان برای همه مبدل‌های روی یک جریان چندان درست نیست و این تفاوت موقعی مشهود است که طراحی تفصیلی مبدل‌ها انجام گیرد [۲].

در مرحله هدف‌گذاری با این‌که افت فشار جریان‌ها بهینه می‌شوند و ضریب‌های انتقال حرارت متناسب با افت فشار به دست می‌آید [۲]، ولی در مورد تأثیر تغییر افت فشار مبدل و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت مبدل تصمیم‌گیری نمی‌شود.

در مرحله بهینه‌سازی می‌توان با بررسی اثرهای تغییر افت فشار مبدل‌ها، تابع هدف سرمایه‌گذاری سالیانه بهینه کرد. افزون بر بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها، افت فشار جریان‌هایی که در مرحله هدف‌گذاری بهینه شده‌اند نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای این منظور سه حالت زیر به عنوان روش‌های بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد:

الف - توزیع افت فشار روی مبدل‌ها متناسب با سطح مبدل.

ب - توزیع افت فشار روی مبدل‌ها متناسب با KAh^m .

ج - بهینه‌سازی افت فشار مبدل با روش ریاضی.

به صورت اجمالی می‌توان اشاره کرد که روش‌های اول و دوم وابسته به مقدارهای اولیه سطح و ضریب انتقال حرارت مبدل هستند، در حالی که روش سوم افت فشار مبدل‌ها را به صورت مستقل بهینه‌سازی می‌کند. در روش اول و دوم بهینه‌سازی بر پایه افت فشار جریان‌ها انجام می‌گیرد. در حالی‌که در روش سوم بهینه‌سازی بر پایه افت فشار مبدل‌ها است که از روش ریاضی سیمپلکس [۴-۶] برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

بهینه‌سازی افت فشار

در شبکه‌های با ملاحظه افت فشار، افت فشار جریان‌ها بهینه‌سازی می‌شوند به نحوی که هزینه سرمایه‌گذاری در مرحله هدف‌گذاری با در نظر گرفتن هزینه‌های افت فشار و سطح کمینه شود. در مرحله هدف‌گذاری بر اساس انتقال حرارت عمودی بین بازه‌های حرارتی، سطوح و افت فشار متناسب جریان‌ها به‌دست می‌آید ولی بعد از مرحله طراحی شبکه واحدهای انتقال حرارت

افت فشار آن جریان را پوشش دهد، در این حالت تابع هزینه از هر دو پارامتر افت فشار و سطح انتقال حرارت به طور مستقل تأثیر می‌پذیرد.

در حالت سوم نیز همچون حالت دوم تابع هزینه از هر دو پارامتر به طور مستقل تأثیر می‌پذیرد، با این تفاوت که تغییر افت فشار مبدل‌ها روی هر جریان محدود نیست. مبدل‌های شبکه نیز می‌توانند افت فشار مجازی در گستره افت فشار جریان‌ها داشته باشند ولی مجموع افت فشار مبدل‌های روی جریان باید با افت فشار جریان برابر باشد.

با توجه به مباحث ذکر شده، بهینه‌سازی افت فشار را به دو بخش بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها و بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها تقسیم می‌کنیم که در بخش اول، افت فشار جریان‌ها را ثابت فرض نموده و با تغییر افت فشار مبدل‌ها در گستره‌ی مجاز توزیع افت فشار بهینه مبدل‌ها را پیدا می‌کنیم و در بخش دوم افت فشار جریان را در یک گستره‌ی مجاز تغییر داده و در پی هر تغییر توزیع افت فشار بهینه مبدل‌ها را مطابق بخش اول بهینه می‌کنیم.

رابطه‌های افت فشار

پنجه‌شاهی [۱]، رابطه بین افت فشار ناشی از اصطکاک و ضریب انتقال حرارت را بر اساس روش بل - دلور^(۱) محاسبه کرده و با فرضیه‌های مناسب رابطه (۱) را برای سمت پوسته و رابطه (۲) را برای سمت لوله مبدل به‌دست آورده است:

$$\Delta P_{ij} = K_{ij} A_i h_{ij}^{m=4/412} \quad (1)$$

$$\Delta P_{ik} = K_{ik} A_i h_{ij}^{n=2/5} \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، ضریب‌های K فقط تابع دبی و خواص فیزیکی سیال عبوری از هر سمت مبدل هستند.

با دانستن افت فشار سمت لوله و پوسته مبدل، اطلاعات حرارتی مبدل و حل هم‌زمان سه معادله زیر:

$$\Delta P_{ij} = K_{ij} A_i h_{ij}^{m=4/412} \quad (3)$$

$$\Delta P_{ik} = K_{ik} A_i h_{ij}^{n=2/5}$$

$$Q_i = U_i^f \times A_i \times LMTD_i \times FT_i$$

می‌توان سطح مبدل و ضریب‌های انتقال حرارت متناظر با افت فشار در هر سمت مبدل را به‌دست آورد.

(1) Beel-Delaware

$$\Delta P_j = \sum_i \Delta P_{ij} = \sum_i K_{ij} A_i h_{ij}^m \quad (6)$$

در این مرحله ضریب‌های K و h و m برای مبدل‌های روی یک جریان را برابر فرض کرده و به رابطه زیر خواهیم رسید.

$$\Delta P_j = \sum_i \Delta P_{ij} = K_{ij} h_{ij}^m \sum_i A_i \quad (7)$$

از رابطه‌های (۱) و (۲) داشتیم:

$$\Delta P_{ij} = K_{ij} h_{ij}^m A_i \quad (8)$$

و در نهایت به رابطه‌ی توزیع افت فشار جریان به نسبت سطح بین مبدل‌ها خواهیم رسید.

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_j \times \frac{A_i}{\sum_i A_i} \quad (9)$$

برای جریان‌های با افت فشار ثابت داریم:

$$\Delta P_j = \text{Const.} \quad (10)$$

و برای جریان‌هایی که افت فشار آنها بهینه‌سازی خواهد شد، براساس شرایط عملیاتی حد بالا و پایین برای افت فشار در نظر می‌گیریم.

$$\Delta P_j^{\min} \leq \Delta P_j \leq \Delta P_j^{\max} \quad (11)$$

در صورت وجود جداکننده روی یک جریان، یک جریان از جریان‌های تقسیم جریان را به عنوان جریان ملاک در نظر گرفته و مبدل‌های روی آن جریان را مثل بقیه مبدل‌های جریان اصلی در نظر گرفته و محاسبه‌های افت فشار انجام می‌شود.

بعد از محاسبه افت فشار مبدل‌های روی جریان ملاک، افت فشار کل جریان ملاک را به دست آورده و افت فشار بقیه جریان‌های جداکننده را برابر افت فشار جریان ملاک گرفته و افت فشار مبدل‌های روی آن جریان‌ها را مطابق رابطه‌ی (۹) به دست می‌آوریم. پس از تعیین افت فشار جریان‌ها و توزیع آن روی مبدل‌های روی جریان با استفاده از رابطه‌های (۳)، ضریب‌های انتقال حرارت و سطح جدید مبدل‌ها را محاسبه کرده و از روی آن هزینه سرمایه‌گذاری کل سالیانه را به دست می‌آوریم.

توزیع افت فشار متناسب با KAh^m

فرایند بهینه‌سازی در این حالت نیز مشابه حالت اول است با این تفاوت که فرض‌های ساده کننده زیر که در حالت اول دلخواه بودند، در نظر گرفته نمی‌شوند:

(مبدل‌های جدید)، سطوح جدید را تعیین می‌کنند.

بر این اساس با تغییر مدل انتقال حرارت عمودی بین بازه‌های حرارتی به انتقال حرارت بین جریان‌ها با مبدل‌های جدید، ایده برای تأثیر تغییرهای افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها برای بهینه‌سازی هزینه سرمایه‌گذاری کل به وجود می‌آید.

همان‌طور که در مرحله هدف‌گذاری افت فشار برخی جریان‌ها ثابت و برخی متغیر بود در این مرحله نیز با توجه به شرایط عملیاتی، افت فشار برخی جریان‌ها ثابت و برخی متغیر در نظر گرفته می‌شود. جریان‌هایی که به علت شرایط ویژه (بخار و آب خنک‌کننده) ضریب انتقال حرارت ثابت دارند نیز در نظر گرفته می‌شوند، با این تفاوت که مقدار افت فشار این جریان‌ها از تابع kAh^m به دست می‌آید.

برای حالت‌های "الف" و "ب" از دیدگاه نظری بالا، افت فشار جریان‌ها ثابت مانده یا بهینه می‌شوند ولی برای حالت "ج" که افت فشار مبدل‌ها اساس کار است، تنها برای جریان‌های با افت فشار ثابت محدودیت مجموع افت فشار مبدل‌ها برابر افت فشار جریان باید برقرار باشد.

فرمولاسیون

در مرحله بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها، بار حرارتی مبدل‌ها ثابت می‌ماند. بنابراین، مصرف سرویس‌های جانبی گرم و سرد نیز ثابت است. در این صورت هزینه سرویس‌های جانبی و برق لازم در این مرحله ثابت می‌ماند، لذا در تابع هدف قیمت سرویس‌های جانبی منظور نمی‌شود.

تابع هدف برای بهینه‌سازی به صورت زیر است [۷]:

$$\text{Ob.F.} = \sum_i a_i + b_i A_i^{c_i} + \sum_p a_p + b_p (q\sqrt{H})_p^{c_p} + \sum_c a_c + b_c W_c^{c_c} + P.C. \quad (5)$$

تابع هدف بالا برای هر سه حالت بهینه‌سازی برابر است. تابع $P.C.$ هزینه برق مصرفی دستگاه‌های افت فشار می‌باشد که با فرض بازده هیدرولیکی ۷۰ درصد محاسبه می‌شود.

توزیع افت فشار متناسب با سطح

همان‌طور که ذکر شد این حالت بر اساس بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها است و افت فشار مبدل‌ها تابعی از افت فشار کل جریان هستند.

در صورتی که جداکننده روی جریان باشد افت فشار جریان اول از مجموع افت فشار مبدل‌های روی جریان اول محاسبه شده و افت فشار بقیه جریان‌ها برابر افت فشار جریان اول خواهد بود. که این محدودیت به محدودیت تساوی جریان‌هایی که افت فشار ثابت دارند، اضافه می‌شود.

جریان‌های اصلی که افت فشار ثابت دارند، مقدارهای ثابتی دارند ولی برای جریان‌های جداکننده افت فشار ثابت در هر مرحله بهینه‌سازی تغییر خواهد کرد ولی از الگوی جریان‌های با افت فشار ثابت پیروی خواهند کرد.

نمودارهای بهینه‌سازی

حالت‌های اول و دوم، نمودارهای مشابهی دارند (نمودار ۱) و تفاوت این دو حالت در نحوه توزیع افت فشار مبدل‌هاست که در حالت اول توزیع متناسب با سطح و در حالت دوم توزیع متناسب با kAh^m استفاده می‌شود. نمودار ۲ نیز شامل الگوریتم بهینه‌سازی افت فشار بر اساس تغییر افت فشار مبدل‌هاست.

مسئله نمونه

برای بررسی تأثیر بهینه‌سازی افت فشار، واحد آروماتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است [۴] (شکل ۱). این شبکه به‌وسیله‌ی روش پینچ طراحی شده و از نظر حرارتی بهینه‌سازی شده است. در این قسمت بهینه‌سازی شبکه از نظر افت فشار، مبدل‌ها و جریان‌ها انجام می‌گیرد. برای مقایسه روش‌های بهینه‌سازی افت فشار، تغییرهایی در مسیر عبور جریان‌ها داده شده است که شامل تغییر مسیر گذر جریان در مبدل‌های ۲، ۳، ۶، ۷ و سرویس‌های C_1 و H_1 است که جریان گرم در این مبدل‌ها از سمت لوله و بقیه مبدل‌ها از سمت پوسته عبور می‌کند.

سطح مبدل‌های شبکه مفروض با استفاده از ضریب‌های انتقال حرارت به‌دست آمده در مرحله هدف‌گذاری محاسبه شده و افت فشار جریان‌ها مطابق مرحله هدف‌گذاری است. برآورد هزینه شبکه مفروض به‌صورت زیر است (جدول ۱).

اطلاعات اقتصادی واحد آروماتیک از مرجع [۷] هستند که در جدول ۲ اشاره شده است.

سطح نهایی مبدل‌ها در جدول ۳ مورد مقایسه قرار گرفته است و برای سهولت، فقط اطلاعات مبدل‌های ۲، ۵، ۶، ۸، C_3 و H_1 مورد بررسی قرار گرفته است. مقدارهای سطح اولیه این مبدل‌ها برای شبکه اولیه نیز ارائه شده است.

الف - تغییر ضریب انتقال حرارت در مبدل‌های روی یک جریان.
ب - تغییر توان ضریب انتقال حرارت به خاطر عبور جریان از سمت لوله یا پوسته مبدل.

ج - تغییر ضریب K به خاطر تغییر دبی در جداکننده.
با توجه به فرض‌های ذکر شده، تغییر سیال عبوری از سمت لوله و پوسته مبدل، افزون بر تأثیر در توان ضریب انتقال حرارت، در مقدار K مربوطه نیز اثر خواهد گذاشت. زیرا مقدار K برای سمت لوله و پوسته مبدل، مقدارهای متفاوتی را داراست.
بهینه‌سازی در این روش مشابه حالت اول است ولی برای توزیع افت فشار جریان بر مبدل‌های روی آن جریان از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta P_j = \sum_i \Delta P_{ij} = \sum_i K_j A_i h_{ij}^m \quad (12)$$

$$\Delta P_{ij} = \Delta P_j \times A_i h_{ij}^m / \sum_i A_i h_{ij}^m \quad (13)$$

در صورت وجود جداکننده، انتخاب جریان ملاک و محاسبه‌های لازم، مشابه حالت اول است.

بهینه‌سازی افت فشار مبدل با روش ریاضی

هدف از بهینه‌سازی، تعیین مقدارهایی برای افت فشار مبدل‌هاست به نحوی که کمترین هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه را داشته باشد. در قسمت قبل با بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها، افت فشار مبدل‌ها مقدارهای مناسبی می‌گرفتند. ولی در این مرحله، افت فشار مبدل‌ها به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود و افت فشار جریان‌ها تابع افت فشار مبدل‌های روی آن جریان خواهد بود. بر پایه شرایط عملیاتی، محدوده‌ای برای جریان‌هایی که افت فشار بهینه دارند در نظر گرفته می‌شود.

$$\Delta P_j^{\min} \leq \Delta P_j = \sum \Delta P_{ij} \leq \Delta P_j^{\max} \quad (14)$$

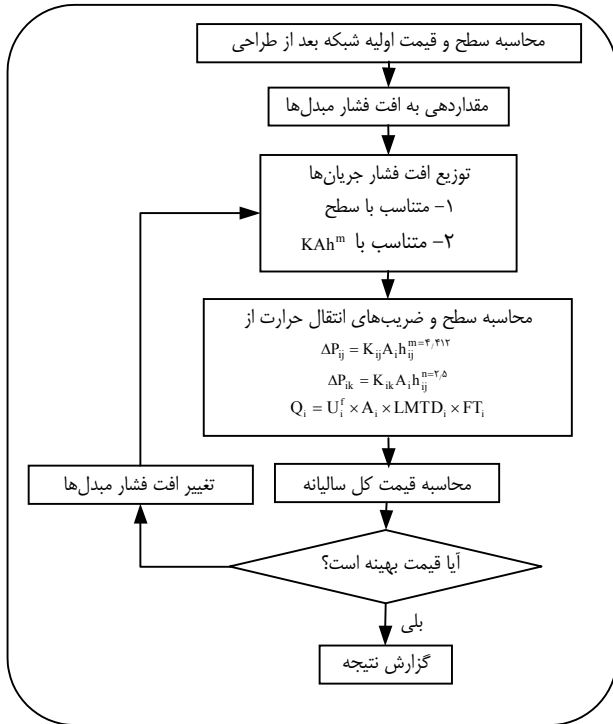
و برای جریان‌های با افت فشار ثابت :

$$\Delta P_j = \sum \Delta P_{ij} = \text{Const.} \quad (15)$$

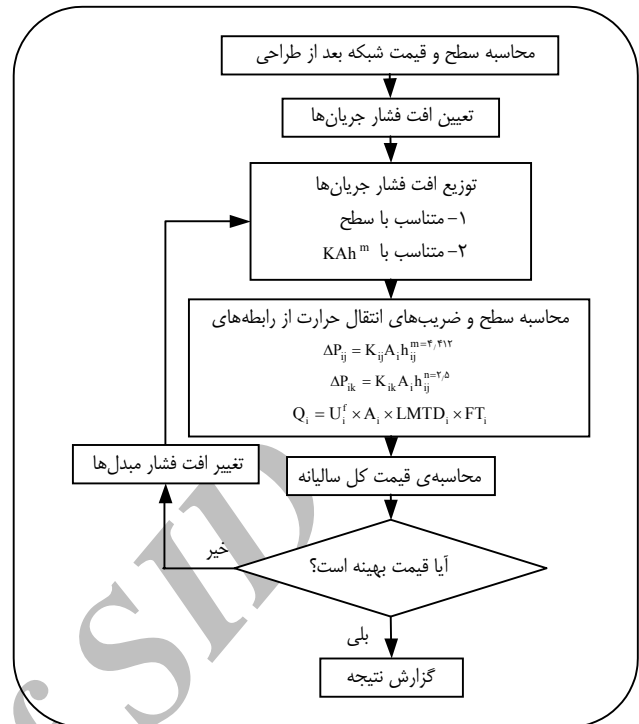
به این صورت در هر مرحله با تعیین مقدارهای افت فشار جریان‌ها و حل معادله‌های مربوط، رابطه‌ی (۳)، تابع قیمت محاسبه می‌شود. اگر افزون بر مبدل، جداکننده نیز روی جریان باشد در آن صورت خواهیم داشت:

$$\Delta P_j = \sum \Delta P_{ij} + \sum \Delta P_{kj}^s \quad (16)$$

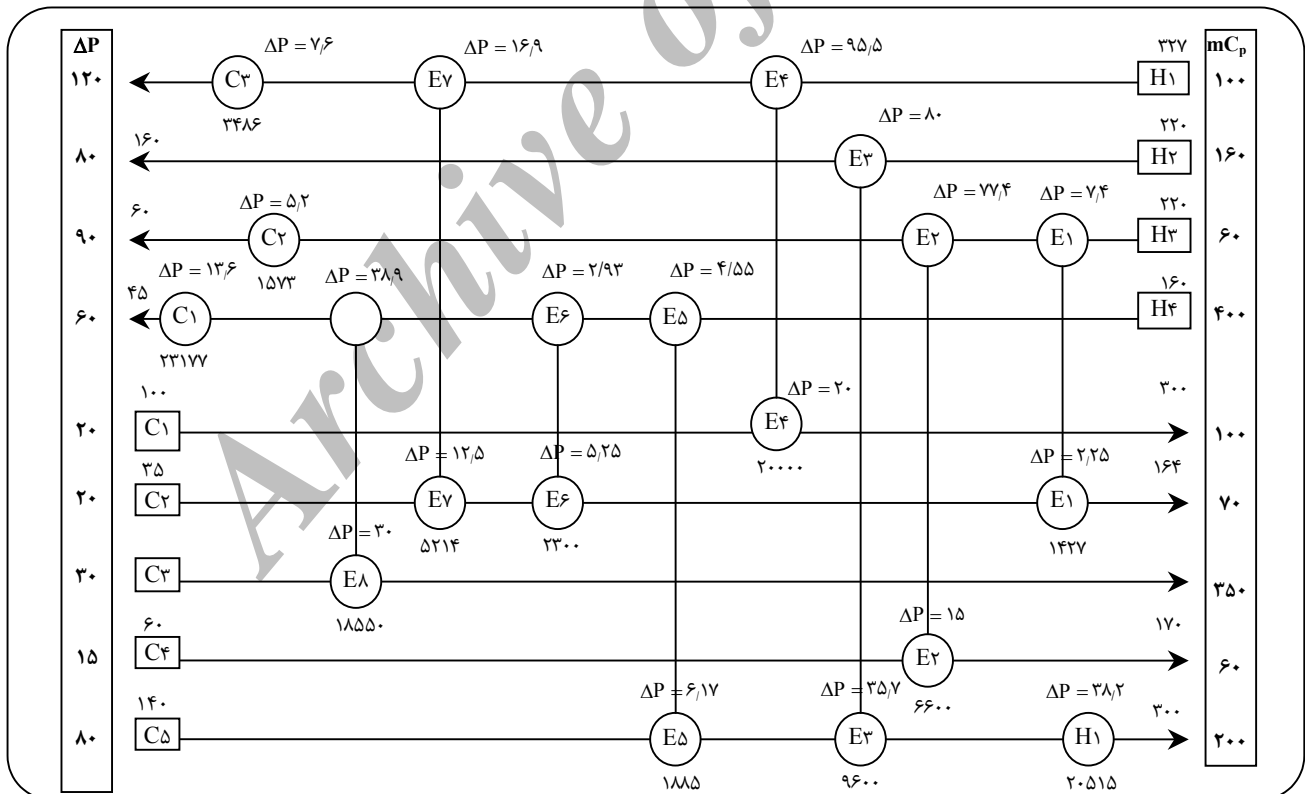
که ΔP_{kj}^s افت فشار کل جداکننده k ام روی جریان j ام است.



نمودار ۲- الگوریتم بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها بر اساس بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها.



نمودار ۱- الگوریتم بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها بر اساس بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها.



شکل ۱- شبکه آروماتیک پس از شکستن حلقه (بار حرارتی: KW، افت فشار: KPa، Δm : °C، mC_p : KW/°C) افت فشار مبدل‌ها، افت فشارهای حاصل از توزیع بهینه افت فشار می‌باشند.

جدول ۱- نتیجه‌های هزینه‌های شبکه در مرحله طراحی.

هزینه کل (£ / yr)	هزینه‌افت فشار (£ / yr)	هزینه سطح (£ / yr)	سطح کل (m ²)
۱۵۶۹۶۵۰	۷۳۳۷۴۱	۸۳۵۹۰۹	۹۴۷۵

جدول ۲- اطلاعات اقتصادی فرایند.

هزینه منبع گرم: ۷۰ £ / kw.yr	عمر مفید واحد (N): ۵ سال
هزینه منبع سرد: ۷ £ / kw.yr	نرخ تورم (i): ۱۵ درصد
هزینه سرمایه‌گذاری سطح: $700(A)^{0.87}$	
هزینه سرمایه‌گذاری پمپ: $2610 \times (q\sqrt{h})^{1.2}$ با بازده هیدرولیکی ۷۰ درصد	
هزینه سرمایه‌گذاری سطح: $(W_c)^{0.62} \times 64/35$ با بازده هیدرولیکی ۷۰ درصد	
هزینه برق مصرفی: ۳۶۰ £ / kw.yr	
عامل ضریب سالیانه: $i(i+1)^N / [(i+1)^N - 1]$	

جدول ۳ - مقایسه نتیجه بهینه‌سازی برای سه روش ارایه شده.

مبدل	سطح اولیه	توزیع متناسب با سطح	توزیع متناسب با KAh ^m	توزیع با روش ریاضی
۲	۷۲۸/۳۱	۵۰۵/۴	۵۰۰/۳	۵۰۲/۳
۵	۲۵۰/۵۷	۱۸۴/۲	۱۸۳/۴۶	۱۸۰/۷
۶	۱۶۱/۴۸	۱۱۰/۵	۱۱۲/۹۸	۱۱۴/۷
۸	۲۱۴۰	۱۵۸۲	۱۵۶۲/۹	۱۵۶۰/۳
C _p	۱۷۳/۲	۱۵۳/۴	۱۴۰/۴	۱۳۰/۴
H _۱	۱۵۴۸/۳۲	۱۲۹۴/۶	۱۲۴۶/۹	۱۲۶۴/۳

جدول ۴ - نتیجه توزیع بهینه افت فشار مبدل‌ها (افت فشار جریان‌ها ثابت).

شبکه نهایی	سطح کل (m ²)	هزینه کل	هزینه افت فشار	هزینه کل	تفاوت (درصد)
قبل از توزیع	۹۴۷۵	۸۳۵۹۰۹	۷۳۳۷۴۱	۱۵۶۹۶۵۰	...
توزیع متناسب با سطح	۷۲۵۷	۶۸۸۶۲۶	۷۳۳۷۴۱	۱۴۲۲۳۶۷	۹/۳۵
توزیع متناسب با KAh ^m	۷۲۳۷	۶۸۷۳۲۱	۷۳۳۷۴۱	۱۴۲۱۰۶۲	۹/۴۷
روش ریاضی	۷۲۳۵	۶۸۷۰۶۲	۷۳۳۷۴۱	۱۴۲۰۸۰۳	۹/۴۸

همان‌طور که مشخص است، توزیع بهینه افت فشار اثر چشم‌گیری در کاهش سطح مبدل‌های حرارتی در مقایسه با سطح به‌دست آمده از ضریب‌های انتقال حرارت اولیه دارد. مقایسه روش‌های ذکر شده نشان می‌دهد که نتیجه دو روش نهایی به هم نزدیک‌تر است و روش توزیع متناسب با سطح، نتیجه متفاوتی را به‌دست می‌آورد که این ناشی از فرضیه‌های ساده‌کننده‌ای است که برای حالت اول در نظر گرفته می‌شود و منجر به انحراف نتیجه از حالت نهایی می‌شود.

نتیجه نهایی بهینه‌سازی افت فشار برای هر سه حالت ذکر شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ نیز نتیجه مشابه جدول ۳ دارد، روش ریاضی و روش توزیع به نسبت KAh^m نتیجه بهتر و مشابه‌تری دارند و می‌توان برای بهینه‌سازی از هر دو روش استفاده کرد. به عبارتی به علت نبود فرضیه‌های ساده‌کننده، روش دوم نتیجه‌های واقعی و مشابه حالت سوم ارایه می‌کند. با در نظر گرفتن زمان اجرای برنامه (جدول ۵)، روش توزیع افت فشار به نسبت KAh^m و روش توزیع افت فشار متناسب با سطح زمان یکسانی دارند و روش توزیع ریاضی افت فشار، زمان بیشتری از دو روش ذکر شده برای رسیدن به جواب نهایی نیاز دارد. در بالا ذکر شد که روش‌های دوم و سوم نتیجه‌های یکسانی دارند، بنابراین استفاده از روش دوم به علت زمان اجرای کم و دقت نتیجه مناسب می‌باشد.

پس از انتخاب روش مناسب برای بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و افت فشار مبدل‌ها، شبکه مورد نظر در دو حالت:

الف - ثابت بودن افت فشار جریان‌ها.

ب - متغیر بودن افت فشار جریان‌ها.

مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است که نتیجه آنها در جدول‌های ۶ و ۷ آمده است.

جدول ۶ نشان می‌دهد که با وجود استفاده از افت فشار برای مرحله هدف‌گذاری و به‌دست آوردن ضریب انتقال حرارت مربوط، این افت فشار می‌تواند در مرحله بهینه‌سازی افت فشار تغییر کند تا منجر به هزینه کل سالیانه کمینه در شبکه نهایی شود.

در جدول ۷ مشاهده می‌شود که بهینه‌ساز با تغییر افت فشار جریان‌ها و افزایش سطح شبکه در نهایت با کاهش چشم‌گیر هزینه افت فشار، منجر به کاهش زیادی در هزینه سالیانه کل شبکه خواهد شد.

اول بر اساس توزیع متناسب با سطح است. چنین روشی ضریب‌های انتقال حرارت برابر برای همه مبدل‌های روی یک جریان گزارش می‌دهد. در این روش فرض بر این است که نخست ضریب‌های K برای یک جریان ثابت است، درحالی‌که در اثر تغییر سمت عبور جریان در مبدل، ضریب K تغییر خواهد کرد. از طرف دیگر K تابع دبی سیال عبوری از جریان می‌باشد و در صورت وجود جداکننده در شبکه، ضریب K به علت تغییر دبی سیال متفاوت خواهد بود. تغییر توان ضریب انتقال حرارت در رابطه افت فشار نیز عامل دیگری در تفاوت نتیجه روش اول است، زیرا سیال عبوری از سمت لوله یا پوسته ضریب‌های متفاوتی را داراست. در صورت در نظر گرفتن ملاحظات ذکر شده به روش دوم که همان توزیع متناسب با KAh^m است، خواهیم رسید. هر دو روش بالا نیاز به حدس اولیه یا سطح‌های به‌دست آمده از مرحله طراحی شبکه دارند.

روش ریاضی فقط به ماهیت مبدل‌های روی شبکه می‌پردازد و صرف‌نظر از مقدارهای سطح اولیه، افت فشار مبدل‌ها را متغیر در نظر گرفته و به سمت تابع هدف حرکت می‌کند. بر این اساس است که نتیجه‌ای بهتر از روش اول، و نتیجه‌ای معادل روش دوم دارد. ولی این روش تعداد متغیرهای بیشتری از روش دوم دارد و در صورتی که مسأله کمی پیچیده‌تر شود زمان زیادی برای رسیدن به جواب لازم دارد، همچنین افزایش تعداد متغیرها منجر به افزایش احتمال رسیدن به نقاط بهینه محلی می‌شود، در صورتی که روش دوم چنین معایبی را ندارد.

نتیجه روش دوم مشابه بهینه‌سازی با روش ریاضی است که این به خاطر عدم فرض ساده کننده و استفاده از مفاهیم مهندسی در توزیع افت فشار جریان روی مبدل‌هاست. در نهایت می‌توان از هر دو روش برای بهینه‌سازی استفاده کرد ولی روش دوم به دلیل زمان کم اجرا از روش سوم مناسب‌تر است.

بهینه‌سازی نهایی که شامل بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و مبدل‌ها است، هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه کمتر از بهینه‌سازی برای جریان‌های با افت فشار ثابت نتیجه می‌دهد، که بیانگر امکان بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها در مرحله هدف‌گذاری است.

بهینه‌سازی بر اساس ضریب‌های اقتصادی می‌تواند منجر به کاهش یا افزایش سطح کل شبکه شود، ولی همان‌طور که ذکر شد، هزینه افت فشار نیز عامل مهمی در هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه است که در نهایت کاهش هزینه کل مقدارهای سطح مبدل‌ها و افت فشار جریان‌ها را تعیین می‌کند.

جدول ۵ - زمان اجرای بهینه‌سازی.

روش توزیع	زمان اجرای بهینه‌سازی (میلی ثانیه)*
متناسب با سطح	۱۰
متناسب با KAh^m	۱۰
روش ریاضی	۳۵۰۰

* P4 (Intel), 1.80 GHz, 256MB RAM

جدول ۶ - افت فشار اولیه و بهینه جریان‌ها.

جریان	افت فشار ثابت اولیه (kPa)	افت فشار بهینه (kPa)
H1	۱۲۰	۲۰۳/۰۵
H2	۸۰	۲۳/۵۳
H3	۹۰	۹۴/۵
H4	۶۰	۲۰/۱/۶
C1	۲۰	۱۱۱/۱
C2	۲۰	۴۱/۳۵
C3	۳۰	۱/۵۱
C4	۱۵	۶۱/۸
C5	۸۰	۱۷۱/۴

جدول ۷ - مقایسه نتیجه‌های بهینه‌سازی افت فشار در دو حالت افت فشار ثابت و افت فشار بهینه جریان‌ها.

شبکه نهایی	سطح کل (m^2)	هزینه سطح	هزینه کل	درصد بهبود
افت فشار ثابت	۷۲۳۷	۶۸۷۳۲۱	۱۴۲۱۰۶۲	۹/۵
افت فشار بهینه	۷۴۸۸	۲۰۴۳۹۱	۹۰۲۱۸۵	۴۲

بحث و نتیجه‌گیری

برای شبکه‌های با ملاحظه افت فشار، رسیدن به توزیع مناسبی از افت فشار مبدل‌ها و جریان‌ها که منجر به کمینه شدن هزینه سرمایه‌گذاری سالیانه شود، مورد نظر خواهد بود. سه روش توزیع افت فشار جریان‌ها روی مبدل‌ها ارائه شده است که روش

		فهرست علائم	
n	توان ضریب انتقال حرارت در سمت لوله		
p	پمپ‌های موجود در شبکه	a_c	ضریب ثابت هزینه نصب کمپرسور
P.C.	هزینه برق مصرفی	a_i	ضریب ثابت هزینه نصب سطح
q	کمپرسورهای موجود در شبکه	a_p	ضریب ثابت هزینه نصب پمپ
Q	مقدار حجمی جریان	A_i	سطح انتقال حرارت مبدل i
Q_i	بار حرارتی مبدل i	b_c	ضریب هزینه نصب کمپرسور
T	دمای جریان	b_i	ضریب هزینه نصب سطح
U_i^f	ضریب انتقال حرارت کلی مبدل i در حالت کثیف	b_p	ضریب هزینه نصب پمپ
ΔP_j	افت فشار جریان j	c_c	توان تابع هزینه کمپرسور
ΔP_{ij}	افت فشار مبدل i روی جریان j	c_i	توان سطح در هزینه سطح
ΔP_{ik}	افت فشار مبدل i بر جریان k	c_p	توان تابع هزینه پمپ
ΔP_{kjl}^s	افت فشار مبدل زام روی شاخه i جداکننده k ام	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
ΔP_j^{\min}	حداقل افت فشار مجاز جریان j	F_{T_i}	ضریب تصحیح مبدل i
ΔP_j^{\max}	حداکثر افت فشار مجاز جریان j	h_{ij}	ضریب انتقال حرارت مبدل i ام روی جریان j
ΔP_{ij}^{\max}	حداکثر افت فشار مجاز مبدل i روی جریان j	H	مقدار ارتفاع ستون پمپ
ΔP_{kj}^s	افت فشار کل جداکننده k ام روی جریان j	i	مبدل‌های شبکه
ΔP_{ij}^{\min}	حداقل افت فشار مجاز مبدل i روی جریان j	j	جریان‌های شبکه
		K_{ij}	ثابت افت فشار جریان z عبوری از مبدل i
		LMTD _i	تفاوت دمای متوسط لگاریتمی مبدل i
		m	توان ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته

تاریخ دریافت: ۱۳۸۳/۴/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۴/۲/۱۲

مراجع

- [1] Polley, G.T., PanjeShahi, M.H., Interfacing Heat Exchanger Network Synthesis and Detailed Heat Exchanger Design, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, **69**, P. 445 (1991).
- [2] PanjeShahi, M.H., "Pressure Drop Consideration in Process Integration" PhD. Thesis, UMIST, (1992).
- [3] Frausto-Hernandez, S. et al., MINLP Synthesis of Heat Exchanger Networks Considering Pressure Drop Effects, *Computers and Chemical Engineering*, **27**, P.1143 (2003).
- [4] Spenley, W., Hext G.R. and Hext F.R., Sequential Application of Simplex Design in Optimization and Evolutionary Operation, *Technometrics*, **4**, P.441 (1962).
- [5] Nelder, J.A. and Mead R., A Simplex Method for Function Minimization, *Computer journal*, **7**, P.308, (1965).
- [6] Rao, S.S., Optimization: Theory and Applications, 2nd Edition, New Delhi, New Age International (p) Limited, Publishers, P.292, (1984).
- [7] فلاحی، حمیدرضا؛ "بهینه‌سازی افت فشار در انتگراسیون فرایند"، رساله دکترا، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۸).