



Synthesis of Heat Exchanger Networks with Considering Pressure Drop and Finding Optimized Streams Path Inside Tube and Shell

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Sadri V.¹ MSc,
Soltani H.*¹ PhD

How to cite this article

Sadri V, Soltani H. Synthesis of Heat Exchanger Networks with Considering Pressure Drop and Finding Optimized Streams Path Inside Tube and Shell. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(5):1127-1134.

ABSTRACT

In this research, taking into account the pressure drop of the streams, a simple and useful method is presented for finding the proper path of hot and cold streams inside shell-tube heat exchangers in the synthesis of heat exchangers networks (HENs). Generally, the HENs synthesis by mathematical programming leads to the problems which are answered by Mixed Integer Non Linear Programming (MINLP) methods. Optimization of such formulations results convergence difficulties due to the existence of both continuous and integer variables. In this study, instead of solving simultaneously integer and continuous variables, the genetic algorithm was used to find optimal HEN structure (integer variables). To find optimal values for continuous variables of the network, by categorizing this type of variables into two groups and using Quasi Linear Programming (QLP) instead of the nonlinear programming model (NLP), the complexity of the NLP model solution is also greatly reduced. The optimal values of continuous and integer variables are obtained with respect to a common objective function that reaches the minimum annual cost of the HEN. The comparison of the proposed method with the references shows that this method has the ability to reduce the cost of pumping flows to about 0.76%.

Keywords Shell-Tube Heat Exchanger Network Synthesis; Pressure Drop; Genetic Algorithm Quasi-Linear Programming (QLP); Optimized Streams Path within Exchangers

¹Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Correspondence

Address: Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran Postal Code: 5451116714.
Phone: +98 (41) 44232175
Fax: +98 (41) 44227872
h-soltani@iau-ahar.ac.ir

Article History

Received: July 1, 2018
Accepted: November 19, 2018
ePublished: May 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Chemical process design ... [2] Nonlinear and mixed-integer optimization: Fundamentals ... [3] Heat exchanger network synthesis: Process optimization by energy ... [4] The pinch design method for heat ... [5] Understanding heat exchanger ... [6] User guide on process integration for the efficient ... [7] Heat-recovery networks: New insights ... [8] Automatic synthesis of optimum heat exchanger ... [9] Optimum design of heat exchanger ... [10] A structural optimization approach in process synthesis-II: Heat ... [11] A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-II: The synthesis ... [12] A generalized method for HEN synthesis using ... [13] A combined genetic algorithm/simulated annealing algorithm for large scale system ... [14] Study on multi-stream heat exchanger network synthesis with parallel genetic/simulated ... [15] A parallel genetic algorithm/simulated annealing algorithm for synthesizing multistream ... [16] Solving heat exchanger network synthesis problems with ... [17] Heat exchanger networks retrofit by coupling genetic algorithm ... [18] Interfacing heat exchanger network synthesis and detailed heat ... [19] Pressure drop considerations for heat exchanger ... [20] Design of heat exchanger networks with different heat transfer coefficients according to the Allowable pressure ... [21] MINLP synthesis of heat exchanger networks considering ... [22] Heat exchanger network synthesis with considering pressure drop by ... [23] Optimal distribution of pressure drop in PDM designed heat ... [24] Heat exchanger networks retrofit with considering pressure drop by coupling genetic algorithm with LP (linear programming) and ILP ... [25] FPressure drop considerations with heat transfer enhancement ... [26] Pressure drop considerations in the retrofit of heat ...

طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن اُفت فشار و تعیین مسیر بهینه جریان‌ها در داخل لوله یا پوسته

واقف صدقی MSc

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

هادی سلطانی PhD

گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

چکیده

در این تحقیق روش ساده و مفید برای پیدا کردن مسیر مناسب جریان‌های سرد و گرم در داخل مبدل‌های حرارتی لوله-پوسته در مسایل طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی (HENS) با در نظر گرفتن اُفت فشار جریان‌ها ارائه شده است. در حالت کلی، طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی به کمک برنامه‌ریزی ریاضی منجر به بروز مشکلاتی می‌شود که به وسیله مدل‌های برنامه‌ریزی اعداد صحیح مخلوط غیرخطی (MINLP) پاسخ داده می‌شود. بهینه‌سازی چنین فرمولاسیون‌هایی به دلیل وجود متغیرهای پیوسته و گسسته باعث ایجاد مشکلاتی در همگرایی می‌شود. در این تحقیق به جای حل همزمان متغیرهای گسسته و پیوسته، از الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن بهینه ساختار شبکه مبدل‌های حرارتی (متغیرهای گسسته) استفاده شده است. برای پیدا کردن مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته شبکه، با دسته‌بندی این نوع از متغیرها به دو گروه و استفاده از فرمولاسیون برنامه‌ریزی شبه‌خطی (QLP) به جای مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، از پیچیدگی حل مدل NLP نیز تا حدود زیادی کاسته شده است. مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته و گسسته با توجه به یک تابع هدف مشترک که رسیدن به حداقل هزینه سالیانه شبکه مبدلی است، به دست می‌آیند. مقایسه روش پیشنهادی با مراجع نشان می‌دهد که این روش توانایی کاهش هزینه پمپاژ جریان‌ها تا حدود ۷۶٪ را دارد.

کلیدواژه‌ها: طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی لوله-پوسته، اُفت فشار، الگوریتم ژنتیک، روش برنامه‌ریزی شبه‌خطی (QLP)، مسیر مناسب جریان‌ها در داخل مبدل‌ها

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۸

* نویسنده مسئول: h-soltani@iau-ahar.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به دیگرام پیازی ارائه شده برای به دست آوردن شرایط بهینه عملکرد واحدهای صنعتی^[1] و اختصاص دو حلقه از پنج حلقه این دیگرام برای سیستم‌های بازیابی حرارتی و مدیریت مصرف یوتیلیتی سرد و گرم، خودبه‌خود اهمیت طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی مشخص می‌شود. این مساله بهینه‌سازی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات پژوهشی در مهندسی سیستم‌های فرآیندی بوده که در سه دهه اخیر، تحقیقات بی‌شماری حول آن انجام پذیرفته است. به‌عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های فلود/اس^[2] و سنوی^[3] اشاره کرد.

در این راستا روش‌ها و نگرش‌های مختلفی برای دستیابی به طراحی بهینه، همانند روش آنالیز پینچ که بر پایه مباحث ترمودینامیک و گرافیکی است^[4-7]، روش برنامه‌ریزی ریاضی که خود به دو قسمت مجزای روش‌های همزمان و روش‌های ترتیبی تقسیم می‌شود^[8-10]، الگوریتم‌های تصادفی و ابتکاری از قبیل الگوریتم ژنتیک^[11, 12] و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^[13-15] و جست‌وجوی ممنوعه^[16] و ترکیبی از روش‌های تصادفی و برنامه‌ریزی ریاضی‌مانند^[17] صورت گرفته است.

مشکل عمده روش‌های بر پایه پینچ و برنامه‌ریزی ریاضی، توانایی کم آنها برای مسایل پیچیده و بزرگ شبکه مبدل‌های حرارتی صنعتی به دلیل افزایش تعداد متغیرها است، در حالی که روش‌های

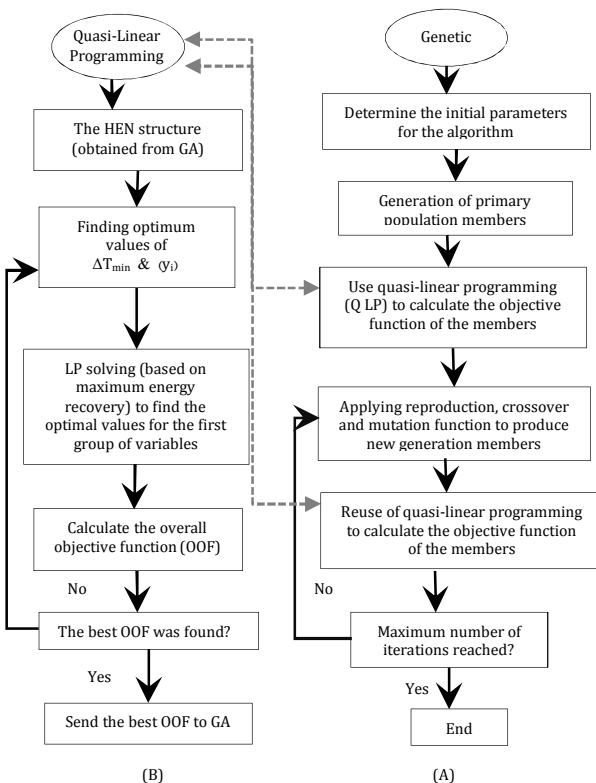
بر پایه الگوریتم‌های تصادفی، این مشکل را ندارند. از طرفی عمده مشکل روش‌های بر پایه الگوریتم‌های تصادفی، زمان‌بر بودن آنها است^[17, 2]. با این وجود در اکثر روش‌های ارائه شده، مساله افت فشار در طراحی شبکه مبدلی در نظر گرفته نشده است.

برای اولین بار، پلی و پنجه‌شاهی^[18] نشان دادند که عدم در نظر گرفتن افت فشار در طراحی شبکه مبدلی، منجر به بروز مشکلات جدی در شبکه نهایی به دست آمده می‌شود. مازاد بودن افت فشار جریان‌ها در شبکه نهایی نسبت به بیشینه افت فشار مجاز برای جریان‌ها یکی از این مشکلات خواهد بود که منجر به رد شبکه نهایی به دست آمده می‌شود. از طرفی اگر افت فشار جریان‌ها از مقدار مینیمم مجاز نیز کمتر باشد، منجر به استفاده اضافه از سطح انتقال حرارت از مقدار ضروری خواهد شد. به دلیل اهمیت این موضوع، محققان مشتاق به در نظر گرفتن افت فشار جریان‌ها در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی شدند که می‌توان به تکنولوژی پینچ^[19, 20]، مباحث برنامه‌ریزی ریاضی^[21] و ترکیب روش‌های تصادفی و ریاضی بهینه‌سازی^[22] اشاره کرد.

پنجه‌شاهی و خوش‌گرد روش جدیدی برای هدف‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی با استفاده از روش پینچ ارائه کردند که در این روش، در کنار رعایت افت فشار مجاز جریان‌ها، ضرایب انتقال حرارت فیلمی جریان‌ها در مرحله هدف‌گذاری و همچنین محاسبه سطح انتقال حرارت نیز در نظر گرفته می‌شود^[20]. در تحقیق مشابهی توسط پنجه‌شاهی و همکاران که از ترکیب روش ریاضی بهینه‌سازی سیمپلکس و تکنولوژی پینچ بهره گرفته می‌شود، بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و توزیع آن بین مبدل‌ها با هدف رسیدن به هزینه سالیانه در شبکه مبدل‌های حرارتی انجام گرفت. در این روش بهینه‌سازی افت فشار در دو بخش بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها و بهینه‌سازی افت فشار مبدل‌ها انجام می‌گیرد. در بخش اول، توزیع افت فشار بهینه مبدل‌ها در محدوده مجاز آن با فرض افت فشار ثابت برای جریان‌ها به دست می‌آید و در بخش بعدی، افت فشار جریان‌ها در محدوده مجاز تغییر داده می‌شود و در پی هر تغییر، توزیع افت فشار بهینه مبدل‌ها همانند بخش اول بهینه می‌شود. با اعمال این روش، کاهش چشمگیری در هزینه افت فشار شبکه مبدلی صورت می‌پذیرفت که منجر به کاهش زیاد در هزینه سالیانه کل شبکه می‌شد^[23]. فراستوهرناندر و همکاران، طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی را با در نظر گرفتن اثرات افت فشار برای دو حالت ضرایب انتقال حرارت ثابت (الف) و ضرایب انتقال حرارت متغیر (ب)، با توجه به حداکثر افت فشار مجاز جریان‌ها با استفاده از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی اعداد صحیح مخلوط غیرخطی (MINLP) انجام دادند. نتایج حاصل نشان داد که با وجود افزایش سطح انتقال حرارت در حالت ب نسبت به حالت الف، هزینه پمپاژ و همچنین هزینه سالیانه شبکه حالت ب نسبت به حالت الف کمتر به دست می‌آید^[21]. با استفاده از نتایج کار فراستوهرناندر و همکاران^[21]، سلطانی و شفیع‌ی با در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت ثابت و استفاده از ترکیب روش برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم ژنتیک، طراحی جدیدی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار جریان‌ها در داخل مبدل‌ها انجام دادند^[22]. همچنین آنها با بسط روش خویش و اضافه کردن مدل ILP به مدل قبلی خود، موفق به ارائه مدلی ساده برای اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن اثرات افت فشار و هزینه‌های مربوطه شدند^[24]. از آخرین کارهای انجام شده در زمینه اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار می‌توان به پژوهش آکیومیه‌میه و اسمیت^[25] اشاره کرد. در این کار

شبه‌خطی برای محاسبه هزینه اعضای (ساختارهای) نسل جدید استفاده شده است و این روند تا رسیدن به تعداد از قبل مشخص شده تکرارها ادامه پیدا می‌کند.

مناسب‌ترین روش برای نشان دادن جایگاه مبدل‌ها در داخل شبکه مبدلی به صورت گره است که در کارلویین^[11] و لویین و همکاران^[12] نیز دیده می‌شود. برای به‌کارگیری عملگرهای الگوریتم ژنتیک، ساختار هر شبکه مبدلی به چندین ژن (یا قسمت) تقسیم می‌شود. در داخل هر ژن، امکان وجود حداکثر سه و حداقل یک مبدل حرارتی وجود دارد. هر ساختار به صورت کدهایی از اعداد نشان داده می‌شوند. این ساختارهای شبکه مبدلی به وسیله الگوریتم ژنتیک به صورت ماتریسی از اعداد به نام ماتریس آدرس‌دهی مبدلی و به صورت کاملاً تصادفی ایجاد می‌شوند. شکل ۲، نمونه‌ای از این ماتریس و ساختار مربوطه را نشان می‌دهد. هر سطر از این ماتریس نشان‌دهنده آدرس هر مبدل حرارتی در شبکه است. در این ماتریس، ستون اول شماره جریان گرم، ستون دوم شماره ژن و ستون سوم نوع اتصال برای جریان گرم (عدد ۲ اتصال به جریان اصلی و عدد ۳ اتصال به جریان جانبی) را نشان می‌دهد. سه ستون بعدی به همین ترتیب برای جریان سرد است. ستون آخر در این ماتریس نشان می‌دهد که برای مبدل حرارتی حاضر جریان گرم در داخل لوله (عدد ۱) جریان دارد یا در داخل پوسته (عدد ۲) است. به عنوان مثال برای مبدل حرارتی دوم E2 که آدرس آن در سطر دوم ماتریس EAM نشان داده شده است، عدد یک شماره جریان گرم، عدد دو شماره ژن برای جایگاه اتصال جریان گرم به مبدل مربوطه، عدد دو نوع اتصال جریان گرم و به همین ترتیب عدد یک شماره جریان سرد، عدد دو شماره ژن و عدد سه نوع اتصال جریان سرد به مبدل E2 را نشان می‌دهد. عدد دو در ستون آخر سطر دوم بیانگر این است که برای این مبدل، جریان گرم در داخل پوسته و جریان سرد در داخل لوله جریان دارد.



شکل ۱) فلوجارت روش پیشنهادی برای طراحی شبکه مبدلی؛ الف) الگوریتم ژنتیک؛ ب) روش برنامه‌ریزی شبه‌خطی

برای حل مشکل روش‌های قبلی که افزایش ضریب انتقال حرارت را در افزایش افت فشار در مبدل‌ها می‌دیدند، با استفاده از یک روش هفت‌مرحله‌ای مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی غیرخطی NLP، موفق به اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار مناسب در کنار افزایش ضرایب انتقال حرارت برای جریان‌ها شدند^[25].

در تمامی کارهای انجام شده، مسیر جریان‌های گرم و سرد در داخل مبدل‌های حرارتی لوله-پوسته، از قبل مشخص می‌شد. هر چند انتخاب مسیر جریان‌ها علاوه بر ملاحظات افت فشاری، به برخی ملاحظات اجباری از جمله اسیدی و خورنده بودن نوع سیال بستگی دارد، اما تعیین بهینه این مسیرها در هر مبدل از شبکه، منجر به کاهش هزینه پمپاژ جریان‌ها و در نتیجه کاهش هزینه سالانه شبکه مبدلی نهایی می‌شود. تحقیق حاضر، روشی ساده برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار جریان‌ها و تعیین مسیر مناسب (مسیر لوله یا پوسته) برای جریان‌ها در هر مبدل ارائه کرده است. این روش از تلفیق الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش‌های تصادفی کارآمد و روش برنامه‌ریزی شبه‌خطی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی بهینه استفاده می‌کند. ساختار شبکه و مسیر بهینه جریان‌ها به وسیله الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. روش برنامه‌ریزی خطی در کنار حلقه جست‌وجوی بیرونی برای پیدا کردن متغیرهای غیرخطی‌ساز (نسبت شکست جریان‌ها و حداقل اختلاف دمای شبکه) که روش برنامه‌ریزی شبه‌خطی را تشکیل می‌دهند، نیز برای پیدا کردن متغیرهای پیوسته هر ساختار اعم از دما، بار حرارتی هر مبدل، سطح انتقال حرارت و افت فشار جریان‌ها استفاده شده است.

۲- تعریف مساله طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی

مساله طراحی شبکه مبدلی به صورت زیر مطرح می‌شود: مجموعه‌ای از جریان‌های گرم و سرد به همراه دمای ورودی و خروجی آنها داده می‌شود. ظرفیت حرارتی ویژه جریان‌ها (C_p) به همراه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h) ثابت فرض می‌شود. علاوه بر این، موارد برای محاسبه افت فشار جریان‌ها، خواص فیزیکی جریان‌ها شامل ثابت هدایت حرارتی (k)، ویسکوزیته (μ) و دانسیته (ρ) آنها نیز مورد نیاز خواهد بود. همچنین اطلاعات اقتصادی برای محاسبه تابع هدف که حداقل هزینه سالیانه شبکه است (شامل هزینه پمپاژ، هزینه الکتریسیته، هزینه یوتیلیتی و هزینه مبدل‌های حرارتی)، لازم خواهد بود.

۳- نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک و روش شبه‌خطی

شکل ۱، فلوجارت کلی نحوه برخورد با مساله طراحی شبکه مبدلی استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

۳-۱- ساختار الگوریتم ژنتیک

پس از مشخص کردن پارامترهای اولیه برای شروع الگوریتم ژنتیک (تعداد اعضا در هر جمعیت، تعداد تکرارها، نرخ جهش، نرخ عملگر تقاطع، تعداد جریان‌های گرم و سرد و تعداد ژن‌ها در هر ساختار)، اعضای جمعیت اولیه به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شوند. در ادامه، ساختار تولیدی برای محاسبه هزینه یا تابع هدف مربوطه، به ساختار برنامه‌ریزی شبه‌خطی فرستاده می‌شود. با توجه به مقدار تابع هدف هر ساختار و کمک‌گیری از عملگرهای تولید مثل، تقاطع و جهش، اعضای نسل بعدی تولید می‌شوند.

در تولید اعضای نسل جدید از ساختارهای نسل قبلی، احتمال به‌کارگیری ساختارهایی که تابع هدف بهتری داشته باشند، بالا است. بدین صورت نسل به نسل، ساختارهای بهتری به وسیله الگوریتم ژنتیک تولید می‌شود. در ادامه، دوباره از برنامه‌ریزی

مدل برنامه‌ریزی خطی با تابع هدف بیشینه، مقدار بازیابی حرارتی که به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود، مقادیر بهینه متغیرهای گروه دوم به دست می‌آید.

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^{\text{no. of exch.}} Q_i + \left(\sum_{i=1}^{2(\text{no. of exch.})} \Delta T \right) / S.F. \quad (1)$$

در این معادله، Q_i بار حرارتی مبدل‌ها، ΔT اختلاف دمای نزدیکی در مبدل‌ها در طرف سرد و گرم و $S.F.$ ضریب مقیاسی است که باید مقدار آن به قدر کافی بزرگ انتخاب شود تا هدف اصلی بهینه‌سازی که رسیدن به حداکثر بازیابی انرژی است را تحت تأثیر قرار ندهد. این عبارت به این دلیل در تابع هدف قرار داده شده است تا از پینچ شدن برخی از مبدل‌ها در ΔT_{\min} جلوگیری کند و مانع از ازدیاد سطح مبدل‌های مورد استفاده شود.

در گام بعدی با استفاده از مقادیر در نظر گرفته شده متغیرهای گروه دوم و مقادیر بهینه محاسبه شده متغیرهای گروه اول، سطح انتقال حرارت هر مبدل و افت فشار جریان در اثر عبور از قسمت لوله یا پوسته مبدل با استفاده از معادلات ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود. معادلات مربوط به افت فشار جریان‌ها برای مبدل‌های لوله-پوسته و جریان‌های تک‌فازی و متلاطم حاکم است.

$$A_i = Q_i / (U \cdot LMTD) \quad (2)$$

$$\Delta P_t = K_t A h_t^{3.5} \quad (3)$$

$$\Delta P_s = K_s A h_s^{5.1} \quad (4)$$

معادلات ۲ و ۳ برای اولین بار توسط پلی و همکاران [26] برای محاسبه افت فشار معرفی شدند که بعدها توسط محققان دیگری [3, 21, 22] بسط داده شدند. در این معادلات، A_i سطح تبادل حرارت در هر مبدل نام، U ضریب انتقال حرارت کلی در هر مبدل، $LMTD$ اختلاف دمای لگاریتمی در اطراف مبدل، ΔP_t و ΔP_s به ترتیب افت فشار جریان در داخل لوله و پوسته، h_t و h_s به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال در داخل لوله و پوسته و K_t و K_s تابع خواص فیزیکی سیال سمت لوله یا پوسته و هندسه مبدل هستند. برای U ساده‌ترین فرمول استفاده شده، ترکیبی از ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی سیالات در داخل لوله و پوسته است که به صورت معادله ۵ تعریف می‌شود:

$$U = (1/h_t + 1/h_s)^{-1} \quad (5)$$

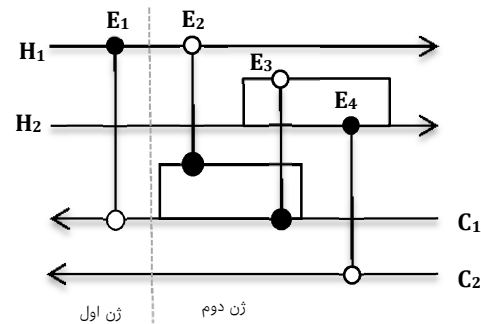
K_t به قطر لوله، مشخصات فیزیکی و شدت جریان سیال داخل لوله و K_s به قطر معادل، گام لوله، مشخصات فیزیکی و شدت جریان سیال داخل پوسته وابسته است. معادلات مربوط به K_t و K_s به صورت معادلات ۶ و ۷ تعریف می‌شوند [3]:

$$K_t = \frac{1}{(0.023)^{2.5}} \times D_t^2 \times \mu_t^{1.1} \times \frac{1}{m_t \rho_t k_t^{7/3} C_p^{7/6}} \times \frac{D}{D_t} \times \left[\left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-0.14} \right]^{4.5} \quad (6)$$

$$K_s = \frac{67 \times L_{tp} \times (L_{tp} - D_t) \times D_e^{1.1} \times \mu_s^{1.3}}{D_t \times m_s \times \rho_s \times k_s^{3.4} \times C_p^{1.7}} \times \left[\left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \right]^{6.2} \quad (7)$$

در معادلات بالا، μ ویسکوزیته، ρ دانسیته، k ضریب انتقال حرارت هدایتی، m دبی جرمی سیال، C_p ظرفیت حرارتی، L_{tp} گام لوله، D قطر داخلی لوله، D_t قطر خارجی لوله و D_e قطر معادل هستند. معادلات ۸ و ۹ قابل محاسبه است [3]:

برای گام مثلی یا سه‌گوش:



شکل ۲) نمونه‌ای از ساختار شبکه مبدل‌های حرارتی همراه با ماتریس آدرس‌دهی مبدلی آن

قابل ذکر است که در تمامی ساختارهای شبکه مبدلی، در انتهای هر جریان، یک مبدل یوتیلیتی در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که دمای جریان خروجی از آخرین مبدل مربوطه (مثلاً دمای خروجی جریان گرم یک از مبدل دوم در شکل ۲)، به دمای در نظر گرفته شده برای آن جریان نرسد، از مبدل یوتیلیتی برای رسیدن به این مهم استفاده خواهد شد، در غیر این صورت، بار حرارتی مبدل یوتیلیتی صفر محاسبه می‌شود.

۳-۲- ساختار برنامه‌ریزی شبه‌خطی

برای محاسبه بهترین تابع هدف (یا هزینه)، هر ساختار شبکه مبدلی تولیدی به وسیله الگوریتم ژنتیک نیاز است که معادلات حاکم بر ساختار نوشته شوند. این معادلات شامل موازنه جرم حول نقاط جدایش، موازنه انرژی حول مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی‌های گرم و سرد برای هر جریان، موازنه انرژی حول نقاط اختلاط جریان‌ها، قیدهای نامساوی برای کاهش و افزایش یکنواخت دما (به ترتیب در طول مسیر جریان‌های گرم و سرد) و قیدهای نامساوی برای رعایت حداقل اختلاف دمایی بین جریان‌های گرم و سرد در ورودی و خروجی هر مبدل حرارتی هستند. برخی از این معادلات (موازنه انرژی حول مبدل‌های فرآیندی و نقاط اختلاط)، غیرخطی است و منجر به غیرخطی شدن کل مدل و تبدیل آن به مدل برنامه‌ریزی غیرخطی NLP می‌شود و حل مساله را مشکل می‌سازد.

برای آسان شدن کار، تعداد متغیرهای پیوسته هر ساختار براساس تعداد ژن‌ها، جریان‌ها و مبدل‌های حرارتی محاسبه می‌شود. متغیرها به دو گروه تقسیم می‌شوند. بدین صورت که گروه اول را متغیرهای معمولی مانند دمای ورودی به مبدل و خروجی از مبدل و بار حرارتی مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی (در صورت استفاده شدن) تشکیل می‌دهند. گروه دوم شامل نسبت شکست جریان‌ها (y_i) و حداقل اختلاف دمای ممکن بین جریان‌های گرم و سرد (ΔT_{\min}) در داخل شبکه است. متغیرهای گروه دوم باعث غیرخطی شدن معادلات حاکم بر مدل می‌شوند. به خاطر پرهیز از حل مدل NLP، ساختار QLP در این مقاله پیشنهاد و مدل برنامه‌ریزی شبه‌خطی از دو حلقه درونی و بیرونی تشکیل شده است.

در حلقه بیرونی، ابتدا مقادیری برای متغیرهای گروه دوم از بازه‌های مربوطه به صورت تصادفی در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، بازه ۰/۰۱ تا ۰/۹۹ برای y_i ها و بازه ۰/۱ تا ۳۰ برای ΔT_{\min} در نظر گرفته شده است. با معلوم بودن مقادیر متغیرهای گروه دوم، معادلات حاکم، رفتار خطی به خود می‌گیرند. بنابراین با استفاده از

در این مثال، جریان‌های گرم در داخل لوله و جریان‌های سرد در داخل پوسته در نظر گرفته شده است. داده‌های ترمودینامیک و فیزیکی جریان‌ها به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و داده‌های اقتصادی در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار ΔT_{min} در مرجع [21] برابر با $10^\circ C$ در نظر گرفته شده است. هزینه شبکه نهایی به دست آمده در مرجع [21] برابر با $158237/51$ دلار در سال بود.

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب بهترین شبکه مبدلی به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی را برای حالت مسیر جریان‌های متغیر در لوله و پوسته (الف) و جریان‌های گرم در لوله و جریان‌های سرد در پوسته (ب) مطابق مرجع [21] را نشان می‌دهند.

جدول ۴ مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی با مرجع [21] را نشان می‌دهد. همان طور که در جدول ۴ مشخص است، زمانی که مسیر جریان‌ها همانند مرجع [21] ثابت در نظر گرفته شوند، نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی (حالت ب) نسبت به مرجع [21] بیش از ۲۳٪ کاهش در هزینه‌های سالیانه را نشان می‌دهد. این مهم خود موید کارآمدی روش در نظر گرفته شده در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی است. علاوه بر این، زمانی که مسیر جریان‌های گرم سرد در داخل مبدل‌های لوله-پوسته متغیر در نظر گرفته شوند (حالت الف)، نتایج به صورت خیلی جزئی بهتر از حالت ب می‌شود (حدود ۵ دلار در سال کاهش هزینه سالیانه). هر چند این مقدار نسبت به هزینه سالیانه کل به دلیل کمبود تعداد مبدل‌ها و جریان‌ها در کل شبکه، خیلی کوچک است (حدود ۰/۰۴٪)، با این وجود بهبود در نتایج موید عملکرد درست روش پیشنهادی است.

جدول ۱) داده‌های ترمودینامیک مورد مطالعاتی اول

نام جریان‌ها	T^{in} ($^{\circ}C$)	T^{out} ($^{\circ}C$)	FCp (kW/K)	H (kW/(m ² .K))
جریان گرم یک (H1)	۱۷۵	۴۵	۱۰	۲/۶۱۵
جریان گرم دو (H2)	۱۲۵	۶۵	۴۰	۱/۳۳۳
جریان سرد یک (C1)	۲۰	۱۵۵	۲۰	۰/۹۱۷
جریان سرد دو (C2)	۴۰	۱۱۲	۱۵	۰/۱۶۶
بخار داغ	۱۷۹	۱۸۰	۵	۵
آب خنک‌کننده	۱۵	۲۵	۲/۵	

جدول ۲) مشخصات فیزیکی جریان‌ها مورد مطالعاتی اول

نام جریان‌ها	چگالی ρ (kg/m^3)	هدایت حرارتی k (W/(m.K))	ویسکوزیته $\mu \times 10^{-3}$ (Ns/m^2)	ظرفیت حرارتی ویژه Cp ($J/(kg.K)$)
جریان گرم یک (H1)	۷۱۶	۰/۱۱	۰/۲۴	۱۶۵۸
جریان گرم دو (H2)	۷۷۷	۰/۱۱	۰/۲۳	۲۶۸۴
جریان سرد یک (C1)	۷۰۰	۰/۱۲	۰/۲۳	۲۴۵۶
جریان سرد دو (C2)	۶۸۰	۰/۱۳	۰/۲۳	۲۲۷۰

جدول ۳) داده‌های اقتصادی مورد مطالعاتی اول

مورد	داده‌های هزینه	توضیحات
هزینه سرمایه‌گذاری مبدل حرارتی (\$)	$120 \cdot A^{0.7}$	A: m ²
هزینه نیرو (\$)	$CW \cdot Q \cdot \Delta P$	Q: m ³ /s, ΔP : Pa
ضریب هزینه (CW) (\$)	۱۱/۵۱ per kW year	
هزینه یوتیلیتی گرم (\$)	۱۱۰ per kW year	
هزینه یوتیلیتی سرد (\$)	۱۰ per kW year	
زمان بازگشت سرمایه (year)	۱	
نرخ تورم	۰ درصد	

$$D_e = \frac{4 \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} L_{tp}^2 - \frac{\pi}{8} D_t^2 \right]}{(\pi/2 \times D_t)} \quad (8)$$

و برای گام مربعی یا چهارگوش:

$$D_e = \frac{4 \times \left[L_{tp}^2 - \frac{\pi}{4} D_t^2 \right]}{(\pi \times D_t)} \quad (9)$$

در گام بعدی، تابع هدف محاسبه می‌شود. اجزای تابع هدف شامل هزینه خرید مبدل‌های حرارتی، هزینه یوتیلیتی گرم و سرد و هزینه پمپاژ است که به صورت معادله ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} C_{HE} &= a + b \times A^c (1 + i)^t / t \\ C_{utility} &= C_{HU} \cdot HU + C_{CU} \cdot CU \\ C_{elec} &= \frac{V \cdot \Delta P}{\eta} 10^{-3} \cdot t \cdot ce \end{aligned} \quad (10)$$

$$C_{pump} = d + e(V\Delta P)^f (1 + i)^t / t$$

در این معادلات C_{HE} هزینه مبدل حرارتی، $C_{utility}$ هزینه یوتیلیتی، C_{elec} هزینه الکتریسیته برای کارکرد پمپ‌ها و C_{pump} هزینه خرید پمپ‌ها است. همچنین C_{CU} و C_{HU} به ترتیب هزینه یوتیلیتی گرم و سرد، CU و HU به ترتیب بار حرارتی یوتیلیتی گرم و سرد، V دبی حجمی جریان‌ها، η بازده دستگاه، ce هزینه واحد برای الکتریسیته، t زمان کارکرد شبکه برحسب سال، i نرخ تورم و حروف a تا f مقادیر ثابتی هستند که برحسب نوع دستگاه فرق خواهند کرد. مجموع این ترم‌ها تابع هدف کلی را تشکیل می‌دهد که هدف کمینه‌کردن کلیه هزینه‌های سالیانه شبکه است.

$$O.O.F. = C_{Global} = C_{HE} + C_{utility} + C_{elec} + C_{pump} \quad (11)$$

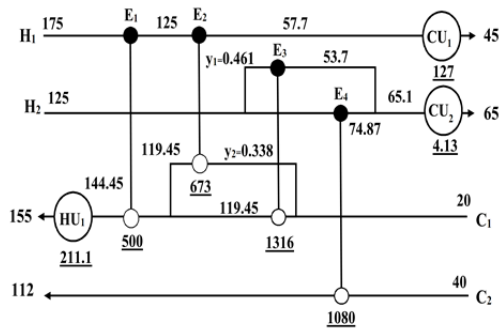
باید توجه شود که تابع هدف محاسبه شده در این مرحله، کمترین مقدار ممکن با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای گروه دوم بود. بنابراین برای محاسبه بهترین مقدار تابع هدف ممکن برای ساختار شبکه مبدلی حاضر، دوباره مقادیر جدیدی برای متغیرهای گروه دوم با توجه به بازه‌های تعریف شده برای هر کدام، در نظر گرفته می‌شود. تمامی مراحل از اول تکرار می‌شود تا مقدار جدیدی برای تابع هدف به دست آید. با مقایسه مقدار جدید با مقدار قبلی، از نو مقادیر جدید برای متغیرهای گروه دوم در نظر گرفته می‌شود. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که بهترین مقادیر متغیرهای گروه دوم یا به عبارتی دیگر، بهترین مقدار تابع هدف برای همان ساختار شبکه مبدلی تولید شده توسط الگوریتم ژنتیک به دست آید. بعد از محاسبه مقدار بهینه تابع هدف برای شبکه مبدل‌های حرارتی، این مقدار به الگوریتم ژنتیک فرستاده می‌شود تا الگوریتم با استفاده از این مقدار و به کمک عملگرهای خود، بهترین چیدمان شبکه مبدلی را پیدا کند.

۴- موارد مطالعاتی

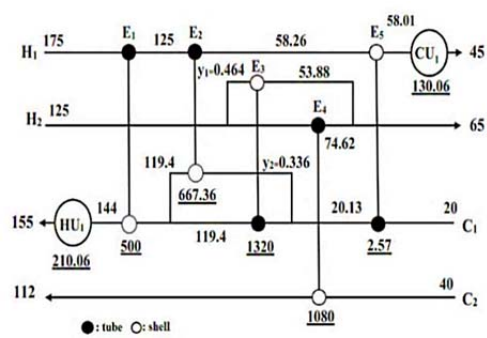
دو مورد مطالعاتی برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار جریان‌ها و مسیر جریان‌های متغیر در سمت لوله و پوسته در نظر گرفته شده است. تعداد تکرارها و تعداد اعضای جمعیت اولیه برای هر دو مورد مطالعاتی، ۵۰ در نظر گرفته شده است. در تمامی شبکه‌های نشان داده شده در شکل‌های آتی، اعدادی که در زیر آنها از خط استفاده شده است، بیانگر بار حرارتی مبدل‌ها هستند.

۴-۱- مورد مطالعاتی اول

این مورد از دو جریان سرد و دو جریان گرم تشکیل شده است [21].



شکل ۴) شبکه بهینه به دست آمده مورد مطالعاتی اول (حالت ب: مسیر جریان های ثابت)



شکل ۳) شبکه بهینه به دست آمده مورد مطالعاتی اول (حالت الف: مسیر جریان های متغیر)

جدول ۴) مقایسه نتایج مورد مطالعاتی اول با مرجع [21]

حالت	ΔT_{min} (°C)	HU (kW)	CU (kW)	هزینه مساحت (\$/year)	هزینه یوتیلیتی و مساحت (\$/year)	هزینه پمپاژ (\$/year)
حالت الف	0/0	7	84029/77	24407/4	108737/2	121602/0
حالت ب	0/50	7	83902/00	24572/3	108474/0	121607/7
مرجع [21]	10	7	70553/70	71800/0	147303/8	158237/0

حالت الف: مسیر جریان های متغیر؛ حالت ب: جریان های گرم در لوله و سرد در پوسته

۴-۲- مورد مطالعاتی دوم

این مورد مطالعاتی شامل چهار جریان گرم و پنج جریان سرد بوده که از مرجع [19] اقتباس شده است. در این مرجع، جریان های گرم در داخل لوله و جریان های سرد داخل پوسته در نظر گرفته شده است [19]. اطلاعات ترمودینامیک و خواص فیزیکی جریانات و همچنین داده های اقتصادی به ترتیب در جدول های ۵ تا ۷ آمده است.

جدول ۵) اطلاعات ترمودینامیک مورد مطالعاتی دوم

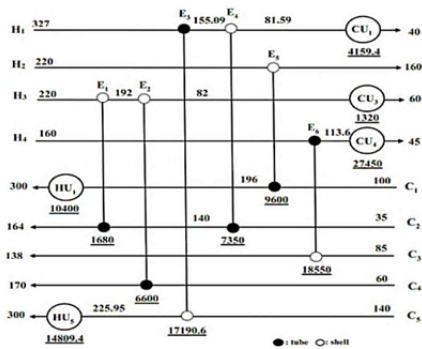
نام جریان ها	T^{in} (°C)	T^{out} (°C)	FCp (kW/K)	h (kW/(m².K))
H1	327	40	100	1/5
H2	220	160	160	1/4
H3	220	60	60	1/14
H4	160	160	400	1/3
C1	300	100	100	1/30
C2	164	35	70	1/7
C3	138	85	350	1/5
C4	170	60	60	1/14
C5	300	140	200	1/6
Hot oil	170	60	250	0/5
CW	300	140	30	1/5

جدول ۶) خواص فیزیکی جریانات مورد مطالعاتی دوم

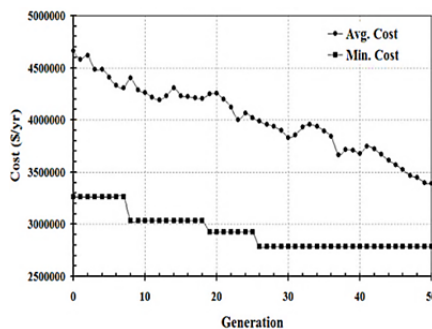
نام جریان ها	چگالی ρ (kg/m³)	هدایت حرارتی K (W/(m.K))	ویسکوزیته $\mu \times 10^{-3}$ (Ns/m²)	ظرفیت حرارتی ویژه Cp (J/(kg.K))
H1	1200	1900	0/1	0/155
H2	1160	1700	0/7	0/18
H3	1070	1600	0/72	0/165
H4	1400	1500	0/12	0/14
C1	880	1400	0/95	0/109
C2	700	1000	0/2	0/21
C3	704	2240	0/17	0/188
C4	600	2700	0/16	0/12
C5	610	2600	0/2	0/12
Hot oil	824	1986	2/9	0/136
CW	1000	4200	1	0/6

جدول ۷) داده های اقتصادی مورد مطالعاتی دوم

مورد	داده های هزینه	توضیحات
هزینه سرمایه گذاری مبدل حرارتی (\$)	$10000 + 670 * A$	A-m²
هزینه سرمایه گذاری پمپ (\$)	$1410 + 90 * (V \cdot \Delta P)^{0.67}$	$V = \frac{m^3}{s}$, $\Delta P = N/m^2$
هزینه الکتریسته (\$)	0.5 per kW h	
هزینه یوتیلیتی گرم (\$)	60 per kW year	
هزینه یوتیلیتی سرد (\$)	6 per kW year	
زمان بازگشت سرمایه (year)	5	
نرخ تورم	0 درصد	
بازده پمپ	75 درصد	
مدت زمان عملیات	8000 h/year	



شکل ۵) شبکه بهینه به دست آمده مورد مطالعاتی دوم



نمودار ۱) بهترین هزینه (نمودار پایین) و میانگین هزینه های هر نسل (نمودار بالا) در مقابل تعداد تکرارها

مطالعات	ΔT_{min} (°C)	HU (kW)	CU (kW)	هزینه مساحت (\$/year)	هزینه یوتیلیتی و مساحت (\$/year)	هزینه پمپاژ (\$/year)	هزینه کلی (\$/year)
مرجع [19]	۲۶/۰۰	۲۵۰۴۰	۳۲۷۶۰	۹۱۹۱۶	۲۶۱۸۱۰۰	۴۶۳۴۰۵	۳۰۸۱۰۰۰
مرجع [22]	۱۵/۱۰	۲۵۲۱۳	۳۲۹۳۳	۷۷۱۰۰۰	۲۴۸۱۴۰۰	۳۰۸۹۰۰	۲۷۹۰۰۰۰
روش پیشنهادی	۱۵/۰۹	۲۵۲۰۹/۴	۳۲۹۲۹/۴	۷۷۱۱۷۳	۲۴۸۱۳۱۴/۴	۳۰۶۵۶۷/۷	۲۷۸۷۸۸۱

جدول ۹) مقایسه مساحت و آفت فشار جریان‌ها در مورد مطالعاتی دوم با مراجع

نام جریان	مساحت [19] (m ²)	مساحت [22] (m ²)	مساحت (روش پیشنهادی) (m ²)	افت فشار (Pa) [19]	افت فشار (Pa) [22]	افت فشار (روش پیشنهادی) (Pa)	درصد کاهش (-) یا افزایش (+) آفت فشار نسبت به مرجع [22]
H1	۱۶۸۴	۱۰۹۸/۷	۱۰۹۹/۷	۵۱۷۳	۳۳۰۳	۳۳۷۸	+۲/۳
H2	۴۵۸	۳۵۵/۵	۳۵۵/۵	۹۳۴۵	۷۲۶۴	۷۲۵۲	-۰/۲
H3	۵۶۰	۶۴۶/۴	۶۴۶/۴	۲۵۸۷۰	۲۹۸۷۷	۲۹۸۶۵	-۰/۰۴
H4	۲۱۰	۲۴۲۰	۲۴۲۰	۱۸۰۲	۲۱۰۹	۲۰۶۶	-۲/۰۴
C1	۱۵۰۲	۷۱۴	۷۱۴	۴۷۷۰۲۱	۲۲۶۷۷۰	۲۲۶۷۶۲	-۰/۰۰۴
C2	۳۶۰	۳۷۵/۱	۳۷۵/۱	۸۳۵۷۷	۸۷۰۸۰	۸۷۲۰۷	+۰/۱۵
C3	۱۳۰۸	۱۰۵۸/۴	۱۰۵۸/۴	۱۵۴۹۵	۱۲۸۶۰	۱۲۵۳۸	-۲/۵
C4	۳۸۹	۵۲۶/۳	۵۲۶/۳	۲۹۳۳۴	۳۹۶۸۰	۳۹۶۷۶	-۰/۰۱
C5	۱۹۶۹	۱۲۰/۲	۱۲۰/۲	۲۷۸۲۷۷	۱۶۹۶۳۰	۱۶۹۸۶۶	+۰/۱۴

مبدل‌ها در شبکه با استفاده از روش ماتریسی، امکان تولید ساختارهای متنوع به وسیله الگوریتم در کنار تنوع مسیر جریان برای لوله و پوسته در هر مبدل برای جریان‌های گرم و سرد را مهیا می‌سازد. همچنین تعریف کدهای یک و دو برای عبور جریان گرم به ترتیب در لوله و پوسته در این ماتریس، این امکان را مهیا می‌سازد که در صورت وجود قیدهایی همچون خوردگی جریانات و موارد مشابه، از قبل مسیر لوله یا پوسته به ترتیب با تعریف عدد یک و دو برای این جریان‌ها در هر مبدل مشخص شود. تقسیم متغیرهای پیوسته به دو گروه و به دست آوردن مقادیر بهینه آنها در دو حلقه تو در تو، با این که باعث زمان بردن عملیات می‌شود، اما احتمال رسیدن به جواب نهایی را افزایش می‌دهد. مقایسه نتایج با مراجع نشان داد که روش مذکور می‌تواند جواب‌های بهتری (هر چند با هزینه سالیانه نسبتاً کمتر) نسبت به مراجع به دست آورد. این روش زمانی کارایی خود را نشان خواهد داد که تعداد جریان‌ها و مبدل‌های حرارتی بیشتری در شبکه مبدل‌های حرارتی وجود داشته باشند.

با توجه به سادگی و قدرت روش ارائه شده در این مقاله، برای برخورد با مسایل طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی و پیدا کردن مسیر بهینه جریان‌های گرم و سرد در داخل مبدل‌های لوله-پوسته، می‌توان این روش را با تغییرات کمی برای طراحی و همچنین اصلاح شبکه مبدل‌های صنعتی واقعی و بزرگ با وجود مشکلات مربوطه از جمله تنوع مبدل‌های حرارتی استفاده شده، تغییر فاز جریان‌ها در داخل مبدل‌ها در اثر تبادل حرارت و آفت فشار، اتصالات ممنوعه (به دلیل موارد اقتصادی یا زیست‌محیطی) و موارد مشابه دیگر به کار برد که می‌تواند به عنوان کارهای آتی برای محققان در نظر گرفته شود.

تشکر و قدردانی: نویسندگان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر و همچنین از جناب آقای مهندس شهریار رحیم‌زاده بابت تلاش‌ها و حمایت‌هایشان در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین محتوای علمی این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد می‌باشد.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارضی با منافع سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

شکل ۵، بهترین جواب به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. نمودار ۱، کارایی الگوریتم ژنتیک را به صورت رسم بهترین جواب به دست آمده و میانگین هزینه هر جمعیت در مقابل تعداد نسل‌ها نشان می‌دهد. رفتار نزولی هر دو منحنی در نمودار ۱ مویید عملکرد درست الگوریتم ژنتیک است و عدم تکرار بهترین جواب بعد از نسل ۲۶م نیز درستی انتخاب ۵۰ تکرار برای این مساله را بیان می‌کند.

جدول‌های ۸ و ۹ مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی با مراجع را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۸، بهترین جواب به دست آمده به وسیله روش پیشنهادی حدود ۰/۰۸٪ نسبت به مرجع [22] و ۹/۵٪ نسبت به مرجع [19]، کاهش در هزینه سالیانه شبکه را نشان می‌دهد. مقایسه مساحت جریان‌ها بین مرجع [22] و روش پیشنهادی نشان می‌دهد که هر دو روش تقریباً مقادیر یکسانی را برای مساحت جریان‌ها پیدا کرده‌اند. اما تغییرات در میزان آفت فشار با توجه به ستون آخر جدول ۹ نشان می‌دهد که پیدا کردن مسیر بهینه جریان‌های سرد و گرم در داخل لوله و پوسته، می‌تواند نسبت به حالت ثابت در نظر گرفتن این مسیرها، در کاهش هزینه‌های پمپاژ و همچنین هزینه سالیانه شبکه مفید واقع شود. نکته مهمی که در تحلیل نتایج به دست آمده بایستی بیان شود، این است که اولاً این نتایج با استفاده از روشی ساده (ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی شبه خطی) نسبت به روش‌های پیچیده سایر مراجع که از مدل‌های NLP یا MINLP در طراحی شبکه مبدلی استفاده می‌کنند، به دست آمده است. ثانیاً با وجود سادگی روش، نتایج حاصل، هر چند از نظر عددی کم، اما بهبود در نتایج را نشان می‌دهد. تنها عیب این روش، مدت زمان رسیدن به جواب است که این مهم نیز به دلیل استفاده از الگوریتم در روند محاسبات غیرقابل اغماض است، اما می‌توان با استفاده از سیستم رایانه‌ای موازی، این مشکل را نیز تا حدود زیادی برطرف نمود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش ساده و مفیدی با تلفیق الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی شبه خطی برای در نظر گرفتن مسیر بهینه جریان‌های سرد و گرم در داخل مبدل‌های لوله و پوسته در طراحی شبکه مبدلی همراه با در نظر گرفتن آفت فشار جریان‌ها ارائه شد. نحوه آدرس‌دهی

of Chemical Engineering. 2004;12(1):66-77.

15- Wei GF, Yao PJ, Luo X, Roetzel W. A parallel genetic algorithm/simulated annealing algorithm for synthesizing multistream heat exchanger networks. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers. 2004;35(3):285-297.

16- Lin B, Miller DC. Solving heat exchanger network synthesis problems with Tabu Search. Computers and Chemical Engineering. 2004;28(8):1451-1464.

17- Rezaei E, Shafiei S. Heat exchanger networks retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods. Computers and Chemical Engineering. 2009;33(9):1451-1459.

18- Polly GT, Panjeh Shahi MH. Interfacing heat exchanger network synthesis and detailed heat exchanger design. Transactions of the Institute of Chemical Engineers. 1991;69(Part A):445-457.

19- Zhu XX, Nie XR. Pressure drop considerations for heat exchanger network grassroots design. Computers and Chemical Engineering. 2002;26(12):1661-1676.

20- Panjeh Shahi MH, Khoshgard A. Design of heat exchanger networks with different heat transfer coefficients according to the Allowable pressure drop flows: A new method of targeting. Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran. 2005;38(5):581-592. [Persian]

21- Frausto-Hernández S, Rico-Ramírez V, Jiménez-Gutiérrez A, Hernández-Castro S. MINLP synthesis of heat exchanger networks considering pressure drop effects. Computers and Chemical Engineering. 2003;27(8-9):1143-1152.

22- Soltani H, Shafiei S. Heat exchanger network synthesis with considering pressure drop by coupling genetic algorithm with Linear Programming method. The 7th International Chemical Engineering Congress (IChEC), 21-24 November, 2011, Kish, Iran. Tehran: Iranian Association of Chemical Engineers; 2011. [Persian]

23- Panjeh Shahi MH, Ali Mandegari A, Fallahi HR, Rezaei Dizjikan H. Optimal distribution of pressure drop in PDM designed heat exchanger networks. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 2005;24(2):1-8. [Persian]

24- Soltani H, Shafiei S. Heat exchanger networks retrofit with considering pressure drop by coupling genetic algorithm with LP (linear programming) and ILP (integer linear programming) methods. Energy. 2011;36(5):2381-2391.

25- Akpomemie MO, Smith R. Pressure drop considerations with heat transfer enhancement in heat exchanger network retrofit. Applied Thermal Engineering. 2017;116:695-708.

26- Polly GT, Panjeh Shahi MH, Jegede FO. Pressure drop considerations in the retrofit of heat exchanger networks. Transactions of the Institute of Chemical Engineer. 1990;68(Part A):211-220.

سهم نویسندگان: واقف صدری (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ هادی سلطانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

منابع

1- Smith R. Chemical process design and integration. 2nd Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2016.

2- Floudas CA. Nonlinear and mixed-integer optimization: Fundamentals and applications. Oxford: Oxford University Press; 1995.

3- Shenoy UV. Heat exchanger network synthesis: Process optimization by energy and resource analysis. Houston: Gulf Publishing Company; 1995.

4- Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks. Chemical Engineering Science. 1983;38(5):745-763.

5- Linnhoff B, Mason DR, Wardle I. Understanding heat exchanger networks. Computers and Chemical Engineering. 1979;3(1-4):295-302.

6- Linnhoff B, Institution of Chemical Engineers (Great Britain). User guide on process integration for the efficient use of energy. Oxford: Pergamon Press; 1982.

7- Linnhoff B, Turner JA. Heat-recovery networks: New insights yield big savings. Chemical Engineering. 1981;88(22):56-70.

8- Floudas CA, Ciric AR, Grossmann IE. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. AIChE Journal. 1986;32(2):276-290.

9- Grossmann IE, Sargent RWH. Optimum design of heat exchanger networks. Computers and Chemical Engineering. 1978;2(1):1-7.

10- Papoulias SA, Grossmann IE. A structural optimization approach in process synthesis-II: Heat recovery networks. Computers and Chemical Engineering. 1983;7(6):707-721.

11- Lewin DR. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-II: The synthesis of cost-optimal networks. Computers and Chemical Engineering. 1998;22(10):1387-1405.

12- Lewin DR, Wang H, Shalev O. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-I. General framework and MER optimal synthesis. Computers and Chemical Engineering. 1998;22(10):1503-1513.

13- Yu H, Fang H, Yao P, Yuan Y. A combined genetic algorithm/simulated annealing algorithm for large scale system energy integration. Computers and Chemical Engineering. 2000;24(8):2023-2035.

14- Wei GF, Yao PJ, Luo X, Wilfried R. Study on multi-stream heat exchanger network synthesis with parallel genetic/simulated annealing algorithm. Chinese Journal