



DOI: 10.22034/ijche.2023.395715.1308

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Relatively Linear Approach for Designing Heat Exchanger Networks with the Possibility of Employing Internal Utility Exchangers

Z. Pirzadeh¹, H. Soltani^{2*}, M. Fallahi-Samberan³, R. Hajimohammadi³, B. MemarMaher³

1- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

University of Maragheh, Maragheh, Iran

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

Email: h.soltani@maragheh.ac.ir

Abstract

This research presents a simple hybrid approach to tackle heat exchanger network (HEN) synthesis problems. The formulations governing these issues are inherently non-convex non-linear models, which are challenging to solve. In this new method, structural variables were managed by genetic algorithm (GA) to reach optimal networks. While the optimization of continuous variables was done in the first section by a linear programming (LP) model and in the second part by a correction procedure (COP). In production structures by the GA, to increase the search space, the possibility of utilizing internal utility exchangers was also provided. In this way, the complex models governing the HEN synthesis problems were transformed into a straightforward and relatively linear hybrid strategy, which increased the likelihood of reaching optimal solutions. Despite the simplicity of the proposed approach, implementing this method in a case study demonstrated its high efficiency in generating new solutions and reducing the total annual cost of the network by 1.21%.

Received: 3 May 2023

Accepted: 21 June 2023

Page Number: 96-108

Keywords:

Heat Exchanger Network Synthesis,
Total Annual Cost,
Optimization, Genetic Algorithm,
Utilizing Internal Utility Exchangers

Please Cite this Article Using:

Pirzadeh, Z., Soltani, H., Fallahi-Samberan, M., Hajimohammadi, R., & MemarMaher, B. (2024). Relatively Linear Approach for Designing Heat Exchanger Networks with the Possibility of Employing Internal Utility Exchangers. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(134), 96-108, [In Persian].



روی کردی نسبتاً خطی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با امکان استفاده از مبدل‌های یوتیلیتی داخلی

زهرا پیرزاده^۱، هادی سلطانی^{۲*}، محراب فلاحی سامبران^۳، رضا حاجی محمدی^۳، بهناز معمارماهر^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

پیام‌نگار: h.soltani@maragheh.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، از یک روش ترکیبی ساده، برای حل مسائل طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی استفاده شد. مدل‌های حاکم بر این مسائل ذاتاً به صورت مدل‌های غیرخطی نامحذب هستند که حل آن‌ها بسیار چالش‌برانگیز است. در این روش جدید، مدیریت متغیرهای ساختاری برای رسیدن به شبکه‌های بهینه به وسیله الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود؛ درحالی‌که، بهینه‌سازی متغیرهای پیوسته به ترتیب در قسمت اول به وسیله مدل برنامه‌ریزی خطی و در قسمت دوم با استفاده از فرایند تصحیح، انجام می‌گردد. در ساختارهای تولیدی به وسیله الگوریتم ژنتیک، برای افزایش فضای جست‌وجو، امکان استفاده از مبدل‌های یوتیلیتی داخلی نیز، مهیا شده‌بود. بدین روش، مدل‌های پیچیده حاکم بر مسائل طراحی شبکه مبدلی، تبدیل به مدل ترکیبی ساده و نسبتاً خطی است که احتمال رسیدن به جواب‌های بهینه را بالا می‌برد. با وجود ساده‌بودن عملکرد روی‌کرد پیشنهادی، اجرای آن بر روی یک مطالعه موردی پر استناد، کارایی بالای آن را در تولید جواب‌های جدید و کاهش هزینه کل سالانه شبکه به میزان ۱/۲۱ درصد، نشان داد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

شماره صفحات: ۹۶ تا ۱۰۸

کلیدواژه‌ها:

طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی،

هزینه سالیانه کل شبکه،

بهینه‌سازی،

الگوریتم ژنتیک،

به‌کارگیری مبدل‌های یوتیلیتی

داخلی

* مراغه، دانشگاه مراغه، دانشکده فنی مهندسی

استناد به مقاله:

پیرزاده، زهرا، سلطانی، هادی، فلاحی سامبران، محراب، حاجی محمدی، رضا، و معمارماهر، بهناز. (۱۴۰۳). روی‌کردی نسبتاً خطی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با امکان استفاده از مبدل‌های یوتیلیتی داخلی، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۴)، ۹۶-۱۰۸.

۱. مقدمه

اهمیت مصرف بهینه انرژی و بازیابی آن از راه انتگراسیون حرارتی در واحدهای صنعتی از جمله پتروشیمی و پالایشگاهی بر هیچ کسی پوشیده نیست. این مهم از دو دیدگاه دارای اهمیت است: نخست کاهش هزینه واحدهای عملیاتی و دومی کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای؛ که در نتیجه به کاهش مصرف انرژی‌های یوتیلیتی در این واحدها، منجر می‌شود [۱]. طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی یکی از روش‌های مفید در زمینه انتگراسیون حرارتی واحدهای صنعتی محسوب می‌شود که به دلیل اهمیت موضوع از چند دهه گذشته مطلوب محققان بوده است [۲ و ۳]. به دلیل حضور هم‌زمان متغیرهای پیوسته و گسسته در این مسائل، مدل‌های بهینه‌سازی حاکم بر این مسائل بسیار پیچیده است و این پیچیدگی با افزایش تعداد جریان‌های فرایندی، افزایش می‌یابد. از همین رو، روی کردهای مختلفی برای برخورد با این مسائل پیشنهاد شده است که می‌توانند در دو گروه کلی روش‌های متوالی و هم‌زمان گروه‌بندی شوند [۴ و ۵]. در روش‌های متوالی، شبکه مبدلی به یک رشته مسائل فرعی تجزیه می‌شود تا نیازمندی‌های محاسباتی مربوطه را کاهش دهد. فناوری پینچ^۱ با در نظر گرفتن قوانین ترمودینامیکی [۶] و روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی متوالی [۷] جزء این زیرمجموعه قرار می‌گیرد. روش فناوری پینچ با وجود انعطاف‌پذیری و ارائه دیدگاه خوب از مسئله، بر تجربه طراح متکی است و به دلیل تمرکز بر بیشترین بازیابی حرارتی، راه‌حل‌های بهینه را در بهینه‌سازی کلی مصرف انرژی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری به‌طور هم‌زمان نمی‌توانست تضمین بکند [۸]. روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی متوالی نیز به دلیل عدم بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرها، در رسیدن به جواب بهینه کلی نسبت به روش‌های هم‌زمان، از عملکرد پائینی برخوردار بود [۹]. روی کردهای هم‌زمان، که در آن‌ها نیازی به تقسیم شبکه نبود، برای رفع نواقص روش‌های متوالی، ایجاد شدند. در این روی کردها، یک سوپراساختار که دربرگیرنده تمامی اتصالات بالقوه بین جریان‌های گرم و سرد بود، در نظر گرفته می‌شد. معروف‌ترین و پرکاربردترین سوپراساختار، ابرساختار مرحله‌ای^۲ (SWS) نام داشت که یی و گراسمن^۳ [۱۰ و ۱۱] ارائه کردند. این سوپراساختارها عمدتاً به صورت

مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی عدد ترکیبی^۴ (MINLP) پیچیده فرمول‌بندی می‌شدند. با وجود برتری‌های این روی کردها، اما به دلیل پیچیدگی حل مدل‌های MINLP حاصل، کاربرد آن‌ها در اوایل، بیشتر برای مسائل شبکه مبدلی با اندازه‌های کوچک بود [۹]. از طرفی مسائل شبکه مبدلی چه به صورت متوالی و چه با فرمول‌های هم‌زمان، به صورت مسائل ان‌پی سخت^۵ (Np-hard) هستند؛ بنابراین، نمی‌توانند در قالب یک راه‌حل دقیق محاسباتی کارآمد قابل حل باشند [۱۲ و ۱۳]. از این رو برای کاهش پیچیدگی مدل‌های MINLP حاکم بر مسائل شبکه مبدلی و افزایش احتمال رسیدن به جواب بهینه، کاربرد الگوریتم‌های تصادفی به‌تنهایی و یا در ترکیب با روش‌های قبلی، در بین محققان افزایش پیدا کرد؛ چراکه این الگوریتم‌ها با وجود زمان بهینه‌سازی نسبتاً بالا، مشکلی در غیرخطی بودن، عدم تحدب و هم‌چنین ناپیوستگی مدل‌های شبکه مبدلی نداشتند [۱۳]. الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۶ (SA) [۱۴]، جست و جوی هارمونی^۷ (HS) [۱۵]، الگوریتم ژنتیک^۸ [۱۶ و ۱۳]، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها^۹ (ACO) [۲۰]، الگوریتم پیاده‌روی تصادفی با تکامل اجباری^{۱۰} (RWCE) [۲۱] و ده‌ها مورد دیگر، از جمله این الگوریتم‌ها هستند. بررسی خوبی را از این روش‌ها در زمینه حل مسائل شبکه مبدلی می‌توان در [۵] یافت.

لوین^{۱۱} [۱۶] یک رویکرد ترکیبی دوسطحی، GA-برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۲} (NLP)، را پیشنهاد کرد که در آن از GA برای تولید ساختارهای شبکه مبدلی از راه نمایش گره، استفاده می‌شد؛ در حالی که مدل NLP برای مدیریت متغیرهای پیوسته براساس حداکثر بازیابی انرژی به کار گرفته شده بود. با وجود سادگی این مدل، حداقل اختلاف دمای نزدیکی^{۱۳} (ΔT_{min}) در شبکه ثابت در نظر گرفته شده بود. یک رویکرد دوسطحی ترکیبی HS و برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی^{۱۴} (SQP) به دست خراسانی و فسقری^{۱۵} [۱۵] برای مقابله با مشکلات طراحی شبکه مبدلی ارائه شد. در سطح بالاتر، شبکه‌های مبدلی با استفاده از HS تولید و سپس این ساختارها به

4. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)
5. Non-Deterministic Polynomial-Time Hard (Np-hard)
6. Simulated Annealing (SA)
7. Harmony Search (HS)
8. Genetic Algorithm (GA)
9. Ant Colony Optimization (ACO)
10. Random Walk Algorithm with Compulsive Evolution (RWCE)
11. Levin
12. Non-Linear Programming (NLP)
13. Minimum Approach Temperature
14. Sequential Quadratic Programming (SQP)
15. Khorasany and Fesangha

1. Pinch Technology
2. Stage-Wise Superstructure (SWS)
3. Yee and Grossmann

با بررسی مراجع به‌ویژه در سال‌های اخیر در زمینه طراحی شبکه مبدلی، چنین به نظر می‌رسد که به‌کارگیری مبدل‌های یوتیلیتی در داخل شبکه مبدلی، علاوه بر استفاده از آن‌ها در انتهای جریان‌های فرایندی، باعث تولید جواب‌های بهتر می‌شود. بنابراین در این تحقیق سعی شده است که با بسط روش ارائه شده در [۱۹] و مهیا کردن امکان تعریف مبدل‌های یوتیلیتی در داخل شبکه، توانایی این روش در برخورد با مسائل طراحی شبکه مبدلی، افزایش یابد. همچنین نکته مهم دیگری که از بررسی روش‌های مختلف حل مسائل طراحی شبکه مبدلی مشخص می‌شود، تلاش برای ارائه روشی ساده است که بتواند در کم‌ترین زمان به جواب بهتری نسبت به روش‌های ارائه شده قبلی دست یابد. روش ارائه شده در این تحقیق نیز از این رویه مستثنی نیست.

در این تحقیق به جای حل هم‌زمان متغیرهای ساختاری و پیوسته شبکه مبدلی، از یک مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک-مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک با توجه به نحوه جست‌وجوی فضای جواب، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های تصادفی به‌ویژه در بهینه‌سازی متغیرهای گسسته شناخته می‌شود [۵]. از این رو در این تحقیق همانند کار فیلی و همکاران [۱۹]، از الگوریتم ژنتیک، برای تولید شبکه‌های مبدلی در طول فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. همچنین این الگوریتم مسئول یافتن ساختار و یا ساختارهای بهینه شبکه مبدلی است. مدل حاکم بر متغیرهای پیوسته هر ساختار شبکه مبدلی تولیدی به وسیله الگوریتم، در حالت کلی به صورت مدل‌های NLP است. برای کاهش پیچیدگی این مدل‌های غیرخطی و افزایش احتمال یافتن مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته، در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی که متشکل از دو قسمت بود، استفاده شد. در قسمت اول این مدل، به کمک مدل LP و یک حلقه جست‌وجوی بیرونی، مقادیر بهینه اولیه متغیرهای پیوسته دما و بار حرارتی مبدل‌ها به دست می‌آیند. در ادامه و به کمک یک فرایند تصحیح خطی که متشکل از یک حلقه جست‌وجوی بیرونی دیگر و حل دستگاه معادلات خطی بود، مقادیر بهینه نهایی این متغیرها و هزینه سالیانه کل شبکه حاصل می‌شد.

سطح پائین منتقل می‌شدند. در سطح پائین بعد از یک پردازش اولیه برای تفسیر ساختار شبکه، بار حرارتی مبدل‌ها، بهینه‌سازی می‌شد تا شبکه‌ای با کم‌ترین هزینه سالیانه کل به دست آید. پنگ و کوی^۱ [۲۲] از روی کرد SA دو سطحی برای رسیدگی به مشکلات شبکه مبدلی استفاده کردند. پورفرهادی میانکوه و شفیع^۲ [۲۰] از الگوریتم ACO تصحیح شده برای تعیین محدوده امکان پذیر مسائل طراحی شبکه مبدلی بهره بردند. عدم استفاده از تقسیم جریان در شبکه، از کاستی‌های این روش بود.

پاواو و همکاران^۳ [۲۳] با استفاده از یک روی کرد ترکیبی SA و بهینه‌سازی آتش‌بازی موشک^۴ (RFO) و در نظر گرفتن یک مدل SWS توسعه یافته، روش جدیدی را برای طراحی شبکه مبدلی ارائه کردند. این روی کرد برتری‌هایی از جمله به کار بردن مبدل‌های فرایندی سری و مبدل‌های یوتیلیتی در جریان‌های تقسیم شده و همچنین امکان ایجاد تقسیم جریان در شاخه‌های تقسیم شده و جریان‌های متقاطع در هر قسمت از مدل SWS را داشت. رائجز و فیگ^۴ [۹] از یک راهبرد جدید ترکیبی، به نام شناسایی ساختار و تغییر سامانه مرجع^۵ (SIR) - الگوریتم ژنتیک ترکیبی^۶ (HGA) برای طراحی شبکه مبدلی استفاده کردند. HGA ترکیبی از GA با شگردهای مختلف بهینه‌سازی مانند استراتژی بهینه‌سازی محلی^۷ و استراتژی کنترل ساختار^۸ بود و برای جست‌وجوی تصادفی کلی مدل SWS استفاده می‌شد. استراتژی SIR نیز یک مدل توسعه یافته برای بهینه‌سازی محلی ساختارهای شبکه مبدلی بود که با کاهش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی، امکان جست‌وجوی بهتر متغیرهای پیوسته را در شبکه فراهم می‌کرد. فیلی و همکاران [۱۹] با استفاده از روش ترکیبی GA - روش برنامه‌ریزی شبه خطی، موفق به ارائه روشی نسبتاً خطی و ساده برای طراحی شبکه مبدلی شدند. ساختارهای شبکه مبدلی به وسیله GA تولید می‌شدند؛ در حالی که متغیرهای پیوسته در دو سطح مدل برنامه‌ریزی شبه خطی، بهینه می‌شدند. با وجود این که این روی کرد نسبتاً خطی، توانایی خوبی در پیدا کردن ساختارهای بهینه داشت، اما از مبدل‌های یوتیلیتی تنها در انتهای جریان‌ها استفاده شده بود.

1. Peng and Cui
2. Pavão et al.
3. Rocket Fireworks Optimization (RFO)
4. Rathjens and Fieg
5. Structure Identification and Change of Reference System
6. Hybrid Genetic Algorithm (HGA)
7. Local Optimizing Strategy
8. Structure Control Strategy

۲. تعریف مسئله

مسائل طراحی شبکه مبدلی بدین صورت تعریف می‌شود: مجموعه‌ای از جریان‌های گرم و سرد فرایندی با دمای ورودی و خروجی مشخص به همراه نرخ ظرفیت گرمایی و ضریب انتقال حرارت جریان‌ها، ارائه می‌شود. همچنین یوتیلیتی‌های گرم و سرد به‌عنوان منابع خارجی برای سرمایه‌ش و گرمایش جریان‌های فرایندی در صورت نیاز، در دسترس هستند. هدف اصلی، رسیدن به شبکه‌ای است که بهترین چیدمان مبدلی با حداقل هزینه سالیانه کل^۱ (TAC)، را داشته باشد. برای محاسبه TAC نیز اطلاعات مربوط به خرید مبدل‌ها و هزینه یوتیلیتی‌های گرم و سرد، در دسترس است.

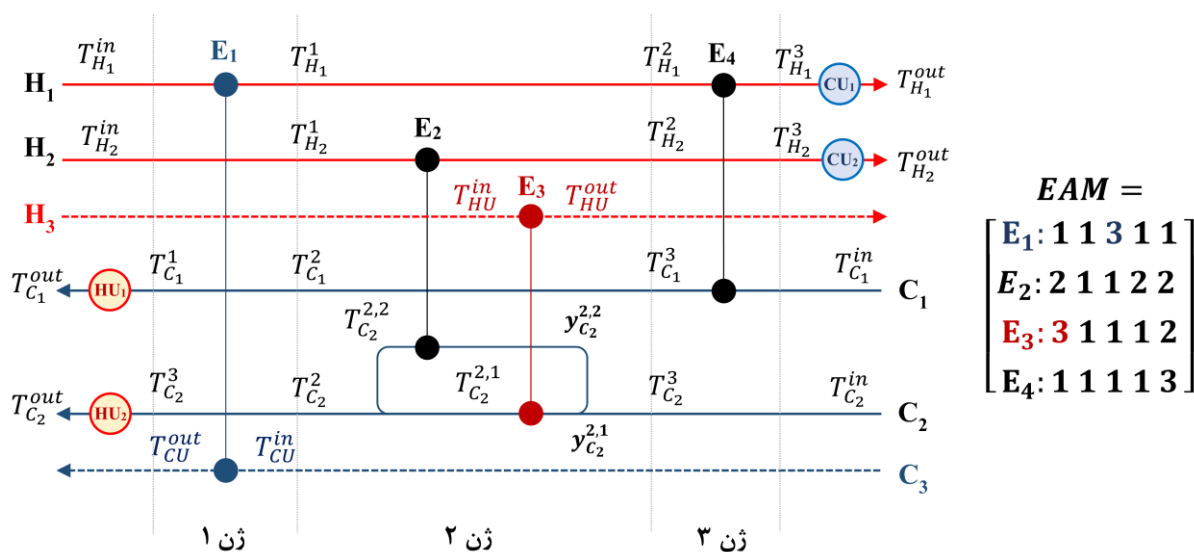
۳. نحوه تولید شبکه‌های مبدلی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک

هر شبکه مبدلی تولیدی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک، به‌عنوان کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که متشکل از چندین ژن است. مبدل‌ها داخل این ژن‌ها آدرس‌دهی (و یا تعریف) می‌شوند. در این تحقیق برای کاهش پیچیدگی شبکه‌های تولیدی، حداکثر سه تقسیم جریان در هر ژن در نظر گرفته‌شد. بنابراین امکان تعریف حداقل یک و حداکثر سه مبدل در هر ژن وجود داشت. همچنین برخلاف کار فیلی و همکاران [۱۹]، امکان تعریف مبدل‌های یوتیلیتی

داخلی در هر قسمت از شبکه مبدلی- اعم از جریان اصلی و یا جریان‌های تقسیم شده- مهیا شد. برای این کار، هر جریان یوتیلیتی به‌عنوان یک جریان مجازی فرایندی در نظر گرفته می‌شد. بدین ترتیب اگر تعداد جریان‌های گرم و سرد فرایندی اصلی به ترتیب با NH و NC نشان داده شود، شماره جریان یوتیلیتی گرم مجازی NH+1 و یوتیلیتی سرد مجازی NC+1 خواهد بود. این نوع الگو را می‌توان برای چندین جریان یوتیلیتی گرم و سرد نیز تعمیم داد.

شکل (۱) نمونه‌ای از یک شبکه مبدلی تولیدی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک را به همراه ماتریس آدرس‌دهی مبدل‌ها^۲ (EAM)، نشان می‌دهد که دارای دو مبدل یوتیلیتی داخلی است (مبدل‌های E₃ و E₁).

در این ماتریس هر ردیف، موقعیت هر مبدل را در داخل شبکه به‌صورت کدهای عددی صحیح بیان می‌کند. ستون اول در این ماتریس بیانگر شماره جریان گرم، ستون دوم نشان‌دهنده شماره گره (که می‌تواند ۱، ۲ و یا عدد ۳ باشد). ستون سوم و چهارم نیز بیانگر شماره جریان سرد و شماره گره مربوطه است. درحالی‌که ستون پنجم بیانگر شماره ژنی است که مبدل مورد نظر، در آن واقع است. این نحوه آدرس‌دهی در کار محققان دیگری چون [۱۳ و ۱۷ و ۱۸ و ۲۴] نیز دیده می‌شود، با این تفاوت که در آن‌ها تنها مبدل‌های فرایندی آدرس‌دهی می‌شدند.



شکل ۱. نمونه‌ای از شبکه مبدلی تولیدی به‌وسیله الگوریتم ژنتیک با ۴ مبدل و ۳ ژن.

Figure 1. A typical heat exchanger network generated by GA with 4 exchangers and 3 genes.

1. Total Annual Cost (TAC)

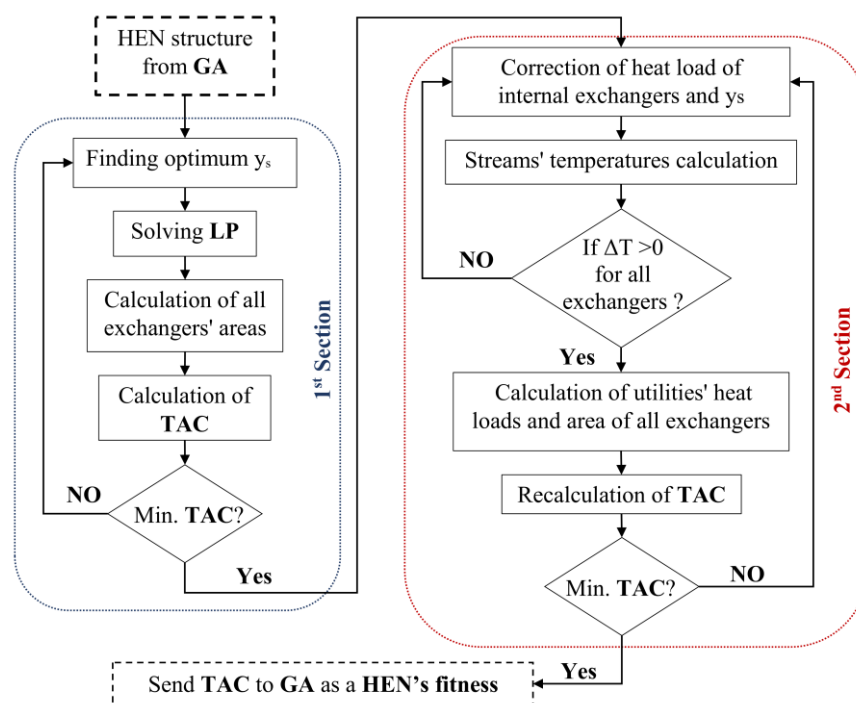
2. Exchanger Address Matrix (EAM)

می‌شوند. نحوه عملکرد این عملگرها در [۱۹] به صورت مفصل شرح داده شده‌است.

۴. نحوه عملکرد مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی

با مشخص شدن ساختار شبکه مبدلی، مدل کلی حاکم بر متغیرهای پیوسته که شامل دمای جریان‌ها، بار حرارتی و سطوح مبدل‌ها، نسبت تقسیم جریان‌ها و ΔT_{min} است، به صورت NLP خواهد بود؛ چراکه معادلات حاکم بر سطوح انتقال حرارت و برخی از موازنه‌های انرژی که نسبت تقسیم جریان‌ها در آن‌ها ظاهر می‌شود، غیرخطی هستند. برای کاهش پیچیدگی حل مدل NLP و افزایش احتمال رسیدن به جواب‌های بهینه، در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی استفاده شد که در آن، متغیرهای غیرخطی کننده مدل از راه حلقه جست‌وجوی بیرونی و سایر متغیرها از راه روش‌های خطی حساب می‌شدند. فلوچارت این مدل، در شکل (۲) نشان داده شده‌است. چنان‌که پیداست این مدل متشکل از دو قسمت است که در هر قسمت، یک حلقه جست‌وجو برای یافتن مقادیر متغیرهای غیرخطی‌ساز مدل، در نظر گرفته شده‌است.

همان‌طور که از شکل (۱) پیداست، شماره جریان سرد مبدل E_1 (یوتیلیتی سرد داخلی) و شماره جریان گرم مبدل E_3 (یوتیلیتی گرم داخلی)، هر دو عدد سه (یعنی: $NH+1$ و $NC+1$) در نظر گرفته شده‌است. توجه شود که دمای جریان‌های ورودی و خروجی جریان‌های یوتیلیتی مجازی (در شکل (۱) جریان‌های H_3 و C_3)، جزء معلومات مسئله است. لازم به ذکر است که در تمامی ساختارهای شبکه مبدلی تولیدی به وسیله الگوریتم ژنتیک، در انتهای هر جریان فرایندی یک مبدل یوتیلیتی در نظر گرفته می‌شود که در صورت لزوم استفاده می‌شود. با این رویکرد، می‌توان اتصالات ممنوعه را نیز هنگام تولید ساختارها به آسانی، در نظر گرفت. پس از تولید کاملاً تصادفی اعضای نسل اول (همانند شکل (۱)) به وسیله الگوریتم ژنتیک، در گام بعدی برای محاسبه هزینه سالیانه کل این شبکه‌ها به عنوان تابع هدف، تمامی این اعضا (یعنی ساختارهای شبکه مبدلی) به مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی، ارسال می‌شوند. نحوه عملکرد این مدل، در قسمت بعدی توضیح داده شده‌است. اعضای نسل‌های بعدی الگوریتم ژنتیک با استفاده از تابع هدف و عملگرهای این الگوریتم که شامل تولید مثل، تقاطع و جهش هستند، برای رسیدن به بهترین ساختار شبکه مبدلی تولید



شکل ۲. فلوچارت مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی.

Figure 2. Flowchart of relatively linear mathematical programming model.

ب: موازنه انرژی برای یوتیلیتی سرد و گرم انتهایی هر جریان فرایندی (معادلات خطی):

$$\begin{aligned} CU_1: T_{H_1}^3 - Q_{CU_1}/W_{H_1} - T_{H_1}^{out} \\ = 0, HU_1: T_{C_1}^1 + Q_{HU_1}/W_{C_1} \\ - T_{C_1}^{out} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

برای سایر مبدل‌های یوتیلیتی گرم و سرد انتهایی جریان‌ها نیز معادلات مشابهی می‌توان نوشت.

ج: موازنه جرم در تقسیم‌کننده‌ها (معادلات خطی):

$$y_{C_1}^{2,1} + y_{C_1}^{2,2} = 1 \quad (4)$$

د: افزایش یا کاهش متوالی دمای جریان‌ها باتوجه به دمای ورودی هر ژن (نامعادلات خطی):

$$\begin{aligned} H_1: T_{H_1}^{in} \geq T_{H_1}^1 \geq T_{H_1}^2 \geq T_{H_1}^3 \geq T_{H_1}^{out} \\ C_1: T_{C_1}^{in} \leq T_{C_1}^3 \leq T_{C_1}^2 \leq T_{C_1}^1 \leq T_{C_1}^{out} \end{aligned} \quad (5)$$

برای سایر جریان‌ها نیز چنین روابطی حاکم است.

ه: رعایت بزرگ‌تر یا مساوی بودن اختلاف دما بین جریان‌های گرم و سرد در ورودی و خروجی مبدل‌های فرایندی و یوتیلیتی از یک مقدار حداقل (ΔT_{min}) (نامعادلات خطی):

$$\begin{aligned} E_1: \Delta T_{1,1} = T_{H_1}^{in} - T_{CU}^{out} \geq \Delta T_{min}, \\ \Delta T_{1,2} = T_{H_1}^1 - T_{CU}^{in} \\ \geq \Delta T_{min} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} E_2: \Delta T_{2,1} = T_{H_2}^1 - T_{C_2}^{2,2} \geq \Delta T_{min}, \\ \Delta T_{2,2} = T_{H_2}^2 - T_{C_2}^3 \\ \geq \Delta T_{min} \end{aligned}$$

روابط مشابهی نیز برای سایر مبدل‌های داخلی و یوتیلیتی انتهایی هر جریان برقرار است.

و: موازنه انرژی نقاط اختلاط (معادلات خطی):

قسمت اول این روش متشکل از مدل LP همراه با یک حلقه جست‌وجو است. مدل LP براساس رسیدن به حداکثر بازیابی انرژی در شبکه کار می‌کند. در این تحقیق برخلاف روش ارائه‌شده در [۱۹] حلقه جست‌وجو تنها برای یافتن مقادیر مطلوب متغیرهای نسبت تقسیم جریان‌ها (y) در بازه تغییرات [۰/۰۱-۰/۹۹] استفاده می‌شود. باوجود اهمیت متغیر ΔT_{min} در هزینه شبکه؛ اما در قسمت اول مدل پیشنهادی نیازی به یافتن مقدار بهینه این متغیر نیست، چراکه این مقدار در انتهای مدل برنامه‌ریزی ریاضی به‌دست خواهد آمد.

۴-۱ قسمت اول - مدل LP

تابع هدف این مدل LP مطابق معادله (۱) تعریف می‌شود:

$$Max. \sum_{k=1}^{NPE} Q_k + \sum_{k=1}^{NIE} (\Delta T_{k,1} + \Delta T_{k,2}) / S.F. \quad (1)$$

در این معادله Q_k بار حرارتی مبدل‌ها، NPE و NIE به ترتیب بیانگر تعداد مبدل‌های فرایندی و داخلی و ΔT اختلاف دما بین جریان‌های گرم و سرد در اطراف مبدل‌ها و $S.F.$ ضریب مقیاسی است که باید به مقدار کافی بزرگ انتخاب شود تا هدف اصلی بهینه‌سازی را که رسیدن به حداکثر بازیابی انرژی است، تحت تأثیر قرار ندهد [۱۹-۱۷ و ۱۳].

قیدهای مساوی و نامساوی مدل LP باتوجه به شکل (۱) به‌صورت زیر خواهد بود:

الف: موازنه انرژی برای مبدل‌های فرایندی و یوتیلیتی داخلی برای هر یک از جریان‌های سرد و گرم موجود در مبدل (معادلات غیرخطی خواهند شد، چنانچه تقسیم‌کننده‌ای وجود داشته باشد):

$$\begin{aligned} E_1: T_{H_1}^{in} - Q_1/W_{H_1} - T_{H_1}^1 = 0, T_{CU}^{in} \text{ and } T_{CU}^{out} \\ = \text{known} \\ E_2: T_{H_2}^1 - Q_2/W_{H_2} - T_{H_2}^2 \\ = 0, T_{C_2}^3 + Q_2/(y_{C_2}^{2,2} \cdot W_{C_2}) \\ - T_{C_2}^{2,2} = 0 \\ E_3: T_{H_3}^{in} \text{ and } T_{H_3}^{out} = \text{known}, \\ T_{C_2}^3 + Q_3/(y_{C_2}^{2,1} \cdot W_{C_2}) - T_{C_2}^{2,1} \\ = 0 \\ E_4: T_{H_1}^2 - Q_4/W_{H_1} - T_{H_1}^3 \\ = 0, T_{C_1}^{in} + Q_4/W_{C_1} - T_{C_1}^3 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$TAC = AF \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{NPE} (C_{fixk} + C_{Ak} \cdot A_k^\beta) + \sum_{i=1}^{NH} (C_{fixc} + C_{Ac} \cdot A_{CUi}^\beta) + \sum_{j=1}^{NC} (C_{fixh} + C_{Ah} \cdot A_{HUj}^\beta) \right\} \quad (9)$$

$$+ \sum_{i=1}^{NH} C_{CU} \cdot Q_{CUi} + \sum_{j=1}^{NC} C_{HU} \cdot Q_{HUj}$$

در این معادله، AF نشان‌دهنده ضریب تبدیل هزینه سرمایه‌گذاری به هزینه سالیانه (فاکتور سالیانه)، C_{CU} و C_{HU} به ترتیب بیانگر هزینه یوتیلیتی سرد و گرم و C_A، C_{fix} و β نیز به ترتیب بیانگر هزینه ثابت، ضریب و توان مربوط به هزینه مبدل‌های فرایندی (با اندیس k)، مبدل‌های یوتیلیتی گرم (با اندیس h) و یوتیلیتی سرد (با اندیس c) هستند. هر چند در اکثر مراجع، تابع هزینه یکسانی برای مبدل‌های فرایندی و یوتیلیتی در نظر گرفته می‌شود؛ در این تحقیق، همان‌طور که از معادله (۹) پیداست، امکان در نظر گرفتن تابع هزینه متفاوت برای مبدل‌های فرایندی و یوتیلیتی، مهیا شده است. مقدار TAC حساب‌شده در معادله (۹)، معیاری برای مدیریت مقادیر نسبت تقسیم جریان‌ها در حلقه جست‌وجوی بیرونی قسمت اول روش برنامه‌ریزی ریاضی در نظر گرفته می‌شود. عملیات در قسمت اول تا رسیدن به مقدار حداقل ممکن TAC تکرار می‌شود.

اما باتوجه به توضیحات داده‌شده، مقادیر متغیرهای تصمیم‌ساز تابع هدف کلی (معادله (۹))، یعنی بار حرارتی یوتیلیتی‌ها و مساحت مبدل‌های حرارتی، در قسمت اول مدل برنامه‌ریزی ریاضی، به صورت هم‌زمان حساب نمی‌شود؛ چراکه بار حرارتی یوتیلیتی‌ها خروجی مدل LP است و مقادیر سطوح انتقال حرارت نیز در ادامه و به صورت غیرمستقیم از نتایج مدل LP حساب می‌شود. بنابراین TAC به دست آمده از این متغیرها در قسمت اول مدل برنامه‌ریزی ریاضی نمی‌تواند مقدار بهینه نهایی شبکه باشد. از این رو برای رسیدن به جواب‌های بهینه بهتر، نتایج حاصل از قسمت اول مدل، به قسمت دوم که یک فرایند تصحیح خطی است، ارسال می‌شود. نحوه عملکرد این قسمت در ادامه توضیح داده شده است.

$$T_{C_2}^2 = y_{C_2}^{2,1} \cdot T_{C_2}^{2,1} + y_{C_2}^{2,2} \cdot T_{C_2}^{2,2} \quad (7)$$

در معادلات (۲) الی (۷) T_{CU}^{out} ، T_{HU}^{out} ، T_{CU}^{in} ، T_{HU}^{in} (۷) به ترتیب بیانگر دمای جریان ورودی و خروجی یوتیلیتی گرم و سرد؛ T_{Hi}^{out} ، T_{Hi}^{in} ، T_{Cj}^{out} و T_{Cj}^{in} به ترتیب بیانگر دمای عرضه (ورودی) و هدف (خروجی) جریان‌های فرایندی گرم i و سرد هستند که جزء اطلاعات معلوم هر مسئله هستند. علاوه بر این T_{Hi}^g و T_{Cj}^g به ترتیب بیانگر دمای گرم i و سرد j خروجی از ژن گام؛ $T_{Hi}^{g,s}$ و $T_{Cj}^{g,s}$ به ترتیب بیانگر دمای جریان‌های گرم i و سرد j شاخه s واقع در ژن گام هستند. Q_{CUi} و Q_{HUj} به ترتیب بیانگر بار حرارتی یوتیلیتی سرد i و گرم j؛ W_{Hi} و W_{Cj} به ترتیب بیانگر نرخ ظرفیت گرمایی جریان گرم i و سرد j هستند. در این معادلات $s \in \{1, 2, 3\}$ و $j \in NC$ ، $i \in NH$ ، $g \in NG$ است. همچنین NG بیانگر تعداد ژن‌هاست. لازم به ذکر است که به دلیل مشخص شدن مقادیر نسبت تقسیم جریان‌ها در حلقه جست‌وجوی بیرونی، قبل از حل مدل LP، موازنه‌های انرژی (یعنی معادله (۲))، حتی با وجود نسبت تقسیم جریان، به فرم خطی در می‌آیند. همچنین برای حل مدل LP از روش سیمپلکس استفاده شد.

نتایج حاصل از مدل LP شامل بار حرارتی مبدل‌ها و دمای جریان‌ها خواهد بود. با داشتن مقادیر دما و بار حرارتی مبدل‌ها، سطوح انتقال حرارت مبدل‌ها از راه معادله (۸) قابل محاسبه خواهد بود.

$$A_k = Q_k / (U_k \cdot LMTD_k), U_k = (h_{Hi} \cdot h_{Cj}) / (h_{Hi} + h_{Cj}).$$

$$A_{CUi} = Q_{CUi} / (U_{CUi} \cdot LMTD_{CUi}), U_{CUi} = (h_{Hi} \cdot h_{CUi}) / (h_{Hi} + h_{CUi}). \quad (8)$$

$$A_{HUj} = Q_{HUj} / (U_{HUj} \cdot LMTD_{HUj}), U_{HUj} = (h_{HUj} \cdot h_{Cj}) / (h_{HUj} + h_{Cj}).$$

که در آن A_k ، A_{CUi} و A_{HUj} به ترتیب بیانگر سطح انتقال حرارت مبدل فرایندی kام، یوتیلیتی سرد نام و یوتیلیتی گرم نام است. همچنین h ضریب انتقال حرارت فیلمی، U ضریب انتقال حرارت کلی مبدل و LMTD نیز بیانگر اختلاف دمای لگاریتمی است. در نهایت TAC شبکه به عنوان تابع هدف اصلی محاسبه می‌شود که هدف اصلی در مسائل شبکه مبدلی، کمینه کردن آن است. این تابع به صورت معادله (۹) تعریف می‌شود:

۴-۲ قسمت دوم - فرایند تصحیح خطی

این مدل به هدف رسیدن به حداقل ممکن هزینه سالیانه کل شبکه مبدلی، با اصلاح هدفمند نتایج قسمت اول، کار می‌کند. این فرایند تصحیح شامل یک حلقه جست‌وجو برای اصلاح بار حرارتی مبدل‌های داخلی (یعنی مبدل‌های فرایندی و یوتیلیتی داخلی) به همراه حل دستگاه معادلات خطی است. در این حلقه جست‌وجو علاوه بر بار حرارتی مبدل‌های داخلی، نسبت تقسیم جریان‌ها نیز مجدداً اصلاح می‌شوند. روند کار بدین صورت است که ابتدا با استفاده از مقادیر بهینه حساب شده برای بار حرارتی مبدل‌های داخلی در قسمت اول، بازه تغییراتی به صورت $[0 - Q_{max}]$ تعریف می‌شود. مقدار Q_{max} با توجه به نرخ ظرفیت گرمایی جریان گرم i و سردی z که در هر مبدل با یکدیگر تبادل حرارت می‌کنند، به صورت معادله (۱۰) تعریف می‌شود:

$$Q_{max} = \min \left\{ W_{Hi} \cdot (T_{Hi}^{in} - T_{Hi}^{out}), W_{Cj} \cdot (T_{Cj}^{out} - T_{Cj}^{in}) \right\} \quad (10)$$

هم‌چنین برای نسبت تقسیم جریان‌ها، بازه تغییرات قبلی در نظر گرفته می‌شود. به محض عدددهی به این متغیرها در حلقه جست‌وجو (یعنی معلوم‌بودن مقادیر بار حرارتی مبدل‌های داخلی و نسبت تقسیم جریان‌ها)، دمای جریان‌های گرم و سرد از راه حل دستگاه معادلات خطی (شبهه معادله (۲))، قابل محاسبه خواهد بود. در ادامه اختلاف دما بین جریان‌های گرم و سرد، در اطراف مبدل‌ها (یعنی ΔT_1 و ΔT_2) حساب می‌شود. اگر مقادیر ΔT برای همه مبدل‌ها بزرگ‌تر از صفر نباشد، مقادیر بار حرارتی مبدل‌های داخلی عدددهی شده در حلقه جست‌وجو، قابل قبول نیست و باید از نو مقادیر مناسبی برای این متغیرها با توجه به بازه تغییراتشان، در نظر گرفته شود. در غیر این صورت بار حرارتی مبدل‌های یوتیلیتی از راه معادلاتی شبهه رابطه (۳) و سطوح انتقال حرارت همه مبدل‌ها با استفاده از روابطی شبهه معادله (۸) حساب می‌شود. در نهایت TAC شبکه از معادله (۹) از نو حساب می‌شود. مقدار حساب شده TAC، به عنوان معیاری برای عدددهی مقادیر بار حرارتی مبدل‌های داخلی و نسبت تقسیم جریان‌ها در این قسمت مد نظر قرار می‌گیرد. برای مدیریت متغیرهای موجود در حلقه جست‌وجوی بیرونی، هم در

قسمت اول و هم در قسمت دوم مدل برنامه‌ریزی ریاضی، از روش بهینه‌سازی نیوتن با در نظر گرفتن بازه تغییرات این متغیرها استفاده شد. در روش بهینه‌سازی نیوتن به جای مشتق تحلیلی، مشتق عددی به کار برده شده بود. مقدار بهینه نهایی TAC به عنوان تابع هدف یا تابع هزینه شبکه، به الگوریتم ژنتیک فرستاده می‌شود. لازم به ذکر است که کم‌ترین مقدار ΔT ‌های حساب شده در این قسمت، به عنوان ΔT_{min} شبکه در نظر گرفته می‌شود. کدنویسی مدل پیشنهادی (الگوریتم ژنتیک و مدل برنامه‌ریزی ریاضی) در محیط نرم‌افزار متلب انجام شد. عملکرد این رویکرد پیشنهادی بر روی یک مورد مطالعاتی پر استناد، در قسمت بعدی بررسی شده است.

۵. مورد مطالعاتی

این مورد مطالعاتی مربوط به واحد عملیاتی آروماتیک با ۴ جریان گرم و ۵ جریان سرد فرایندی به همراه یک جریان یوتیلیتی سرد و یک جریان یوتیلیتی گرم است. این شبکه مبدلی را برای نخستین بار لینف و احمد^۱ [۲۵] ارائه کردند که اطلاعات آن در جدول (۱) آورده شده است. برای اعمال روش پیشنهادی بر روی این مورد مطالعاتی، ۱۲ ژن برای تولید ساختارهای شبکه مبدلی به وسیله الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد. نرخ عملگر تولید مثل در الگوریتم ژنتیک، ۵۰ درصد در نظر گرفته شد که شامل عملگر تولید مثل تصادفی (۴۵ درصد) و عملگر نخبه‌گرایی (۵ درصد) بود. نرخ عملگرهای تقاطع و جهش نیز به ترتیب ۵۰ و ۲ درصد انتخاب شدند. هم‌چنین جمعیت اولیه و تعداد نسل‌های الگوریتم برای رسیدن به ساختار نهایی، ۴۰ در نظر گرفته شد. این اعداد با توجه به تعداد جریان‌های فرایندی و بعد از بررسی چندین عدد، با هدف رسیدن به کم‌ترین مقدار TAC در مدت‌زمان کم به دست آمدند. زمان بهینه‌سازی به دست آمده نیز حدود ۹۰/۷ دقیقه بود.

شکل (۳-ا) عملکرد الگوریتم ژنتیک را در رسیدن به جواب بهینه نهایی به صورت منحنی‌های حداقل و متوسط هزینه هر نسل در مقابل تعداد نسل‌ها، نشان می‌دهد. روند نزولی منحنی‌ها و عدم تغییر بهترین جواب در چند نسل آخر، مؤید انتخاب مشخصه‌های مناسب برای الگوریتم ژنتیک در این مورد مطالعاتی است. شکل (۳-ب) نیز اهمیت استفاده از فرایند تصحیح (قسمت دوم)

1. Linnhoff and Ahmad

جریان سرد C₅ در انتهای جریان، همانند جریان C₁ استفاده می‌شد، با وجود ثابت بودن بار حرارتی به دلیل تغییر ΔT اطراف مبدل، $LMTD$ حساب شده کاهش پیدا می‌کرد و در نتیجه سطح انتقال حرارت و هزینه خرید آن مبدل، افزایش می‌یافت. در نهایت نیز مقدار بزرگ‌تری برای TAC شبکه به دست می‌آمد.

جدول (۲) مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی با مراجع را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول برمی‌آید، بهترین جواب گزارش شده در مراجع مربوط به کار لیو و همکاران [۲۶] با هزینه سالانه کل ۲/۸۹۱/۱۰۸ دلار در سال است که در آن نیز از مبدل‌های یوتیلیتی داخلی در شبکه بهینه مربوطه، استفاده شده بود.

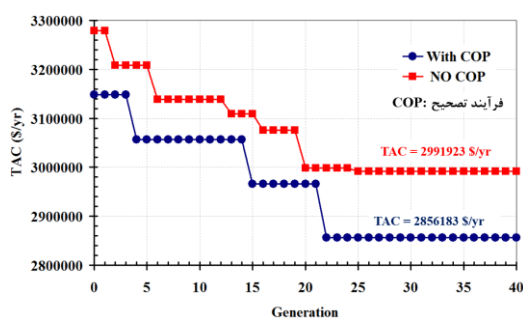
در مدل پیشنهادی راه، نسبت به زمانی که این فرایند استفاده نشود، در رسیدن به جواب بهینه نهایی نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، استفاده از فرایند تصحیح در این مورد مطالعاتی، باعث کاهش TAC شبکه، بیش از ۱۳۵ هزار دلار در سال شده است. بهترین ساختار شبکه مبدلی به دست آمده در شکل (۴) نشان داده شده است که هزینه سالانه کل آن برابر ۲/۸۵۶/۱۸۳ دلار در سال با $\Delta T_{\min} = 12/8^{\circ}\text{C}$ است. از ویژگی‌های ساختار بهینه نهایی، به کارگیری یوتیلیتی گرم داخلی بر روی جریان سرد پنجم (C₅) است. در این شکل اعدادی که زیر آن‌ها خط کشیده شده، بیانگر بار حرارتی مبدل‌ها (kW) هستند. در صورتی که مبدل یوتیلیتی روی

جدول ۱. اطلاعات جریانی و داده‌های اقتصادی مورد مطالعاتی.

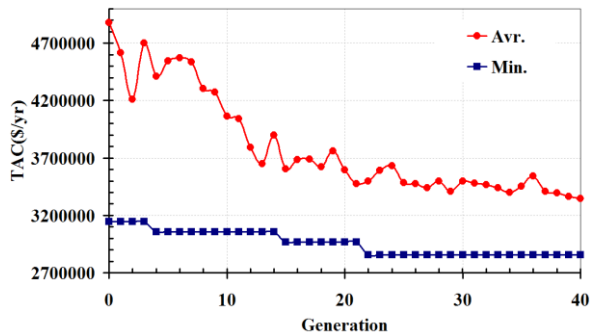
Table 1. Stream and cost data for the first case study.

Stream	$T_{in} (^{\circ}\text{C})$	$T_{out} (^{\circ}\text{C})$	$W (\text{kW}\cdot\text{K}^{-1})$	$h (\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	Cost ($\text{\$}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$)
H ₁	327	40	100	0.50	
H ₂	220	160	160	0.40	
H ₃	220	60	60	0.14	
H ₄	160	45	400	0.30	
C ₁	100	300	100	0.35	
C ₂	35	164	70	0.70	
C ₃	85	138	350	0.50	
C ₄	60	170	60	0.14	
C ₅	140	300	200	0.60	
Steam	330	250		0.50	60
Water	15	30		0.50	6

Annual cost ($\text{\$/yr}$): $2000+70 A$ for all HEs (A in m^2)



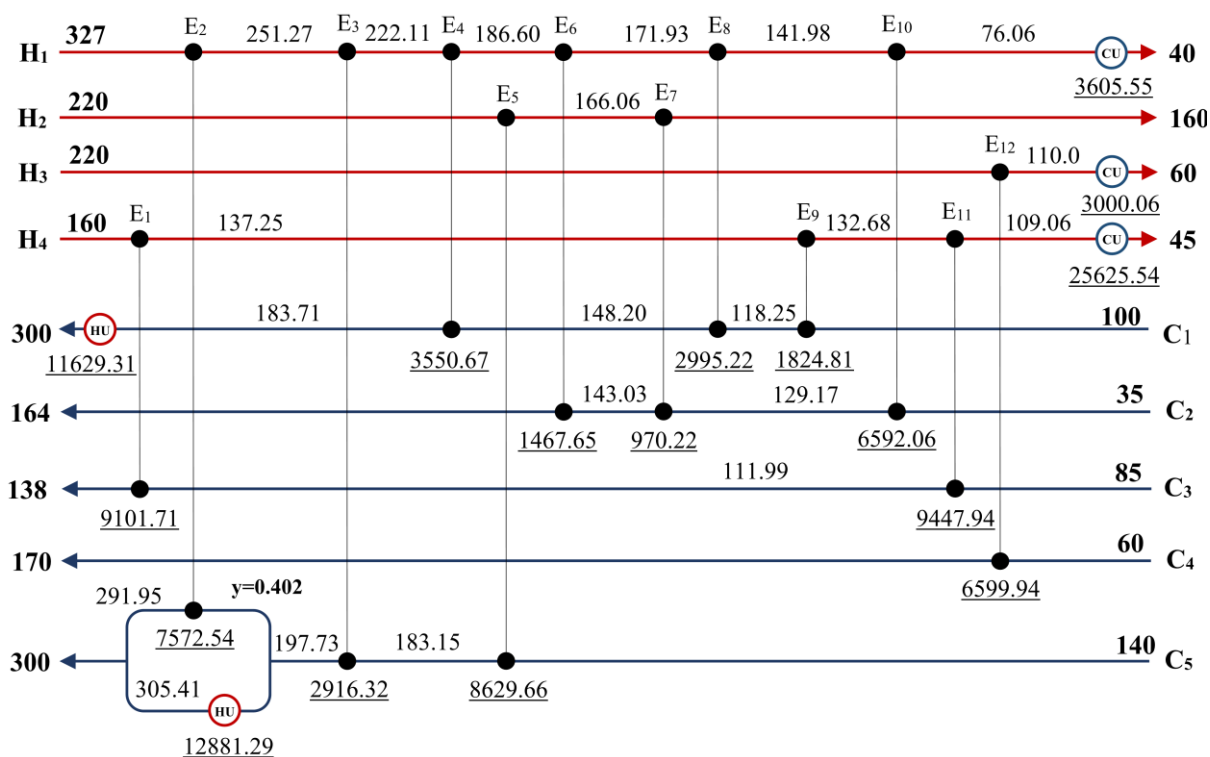
(b)



(a)

شکل ۳. (a) عملکرد الگوریتم ژنتیک و (b) اهمیت استفاده از فرایند تصحیح.

Figure 3. (a) Performance of the genetic algorithm, and (b) importance of operating the correction procedure.



شکل ۴. شبکه بهینه به دست آمده با روش پیشنهادی.

Figure 4. The optimal network obtained by the proposed method.

جدول ۲. مقایسه نتایج با مراجع.

Table 2. Comparison of the results.

	Units	Q_{HU} (kW)	Q_{CU} (kW)	Total Area (m^2)	TAC (\$/yr)
Linnhoff and Ahmad [25]	13	-	-	-	2,992,000
Fieg et al. [8]	14	23615	31335	-	2,922,298
Pavão et al. [23]	14	24758	32478	17165	2,909,906
Rathjens and Fieg [9]	17	24153	31873	17407	2,892,924
Feily et al. [19]	12	23852.4	31572.4	-	2,919,676
Liu et al. [26]	16	24460	32182	17122	2,891,108
This work	17	24510.6	32231.2	16545.2	2,856,183

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، به جای حل هم‌زمان متغیرهای ساختاری و پیوسته مسائل طراحی شبکه مبدلی، با مبنا قراردادن روش فیلی و همکاران [۱۹]، یک رویکرد ترکیبی ساده، الگوریتم ژنتیک-مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی، بسط داده شد. در این روش الگوریتم ژنتیک، مسئول تولید ساختارهای شبکه مبدلی و همچنین

باتوجه به جدول (۲)، هزینه سالیانه کل شبکه بهینه به دست آمده در این تحقیق بیش از ۳۵/۹۲۴ دلار در سال (حدود ۱/۲۱٪) کمتر از این جواب است. نکته مهم دیگر، تفاوت ۶۳/۴۹۳ دلار در سال در هزینه سالیانه شبکه بهینه [۱۹] نسبت به شبکه بهینه به دست آمده در این تحقیق است که مؤید کارایی استفاده از مبدل‌های یوتیلیتی در داخل شبکه است.

- synthesis—III: Total processing systems. *Computers & Chemical Engineering*, 7(6), 723-734. doi:https://doi.org/10.1016/0098-1354(83)85024-8
- [8] Fieg, G., Luo, X., & Jeżowski, J. (2009). A monogenetic algorithm for optimal design of large-scale heat exchanger networks. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(11), 1506-1516. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.10.003
- [9] Rathjens, M., & Fieg, G. (2020). A novel hybrid strategy for cost-optimal heat exchanger network synthesis suited for large-scale problems. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114771. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114771
- [10] Yee, T. F., Grossmann, I. E., & Kravanja, Z. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration—I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers. *Computers & Chemical Engineering*, 14(10), 1151-1164. doi:https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)85009-Y
- [11] Yee, T. F., & Grossmann, I. E. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 14(10), 1165-1184. doi:https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)85010-8
- [12] Furman, K. C., & Sahinidis, N. V. (2001). Computational complexity of heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 25(9), 1371-1390. doi:https://doi.org/10.1016/S0098-1354(01)00681-0
- [13] Rezaei, E., & Shafiei, S. (2008). An Efficient Coupled Genetic Algorithm-NLP Method for Heat Exchanger Network Synthesis. *Iranian Journal of Chemical Engineering(IJChE)*, 5(1), 22-33.
- [14] Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., & Domenech, S. (1997). Synthesis of heat-exchanger network by simulated annealing and NLP procedures. *AIChE Journal*, 43(11), 3007-3020. doi:https://doi.org/10.1002/aic.690431113
- [15] Khorasany, R. M., & Fesanghary, M. (2009). A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks. *Computers & Chemical Engineering*, 33(8), 1363-1370. doi:https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.12.004
- [16] Lewin, D. R. (1998). A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization — II.: The synthesis of cost-optimal networks. *Computers & Chemical Engineering*, 22(10), 1387-1405. doi:https://doi.org/10.1016/S0098-1354(98)00221-X
- [17] Behroozsarand, A., & Soltani, H. (2014). Hydrogen plant heat exchanger networks synthesis using coupled Genetic Algorithm-LP method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 19, 62-73. doi:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.04.015
- یافتن ساختار بهینه بود؛ درحالی که مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته به جای استفاده از یک مدل NLP از راه مدل برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی حساب می‌شدند. در این روی‌کرد جدید امکان در نظر گرفتن مبدل‌های یوتیلیتی داخلی در ساختارهای تولیدی به وسیله الگوریتم ژنتیک مهیا شده بود. هم‌چنین برخلاف [۱۹] نیازی به بهینه‌کردن مستقیم ΔT_{min} نبود؛ چراکه مقدار بهینه آن در انتهای روش برنامه‌ریزی ریاضی نسبتاً خطی به دست می‌آمد. بررسی مورد مطالعاتی نشان داد که با وجود سادگی روش پیشنهادی، کارایی آن در رسیدن به جواب‌های بهینه بهتر نسبت به مراجع، بالاست، به طوری که قادر بود TAC شبکه را تا ۱/۲۱ بیشتر کاهش دهد. مقایسه نتیجه به دست آمده با [۱۹] نیز مؤید مؤثر بودن استفاده از مبدل‌های یوتیلیتی در داخل شبکه در کاهش TAC بود.

مراجع

- [1] Hojjati, M. (2017). Retrofitting Heat Exchanger Network of Distillation Units of the Shiraz oil Refinery. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 15 (88), 53-63, In Persian.
- [2] Morar, M., & Agachi, P. S. (2010). Review: Important contributions in development and improvement of the heat integration techniques. *Computers & Chemical Engineering*, 34(8), 1171-1179. doi:https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.02.038
- [3] Ghazizahedi, Z., & Hayati-Ashtiani, M. (2022). Investigating the Application of Heat Pump in Isomerization Unit to Decrease the Energy Consumption by Means of Pinch Technology. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(119), 53-63, In Persian.
- [4] Furman, K. C., & Sahinidis, N. V. (2002). A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(10), 2335-2370. doi:10.1021/ie010389e
- [5] Toimil, D., & Gómez, A. (2017). Review of metaheuristics applied to heat exchanger network design. *International Transactions in Operational Research*, 24(1-2), 7-26. doi:https://doi.org/10.1111/itor.12296
- [6] Linnhoff, B., & Hindmarsh, E. (1983). The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 745-763. doi:https://doi.org/10.1016/0098-2509(83)80185-7
- [7] Papoulias, S. A., & Grossmann, I. E. (1983). A structural optimization approach in process

- [18] Sadri, V., & Soltani, H. (2019). Synthesis of Heat Exchanger Networks with Considering Pressure Drop and Finding Optimized Streams Path Inside Tube and Shell. *Modares Mechanical Engineering*, 19(5), 1127-1134, In Persian.
- [19] Feyli, B., Soltani, H., Hajimohammadi, R., Fallahi-Samberan, M., & Eyvazzadeh, A. (2022). A reliable approach for heat exchanger networks synthesis with stream splitting by coupling genetic algorithm with modified quasi-linear programming method. *Chemical Engineering Science*, 248, 117140. doi:https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117140
- [20] Pourfarhady Myankooh, Y., & Shafiei, S. (2016). A specific strategy for determination of feasible domain of heat exchanger networks with no stream splitting and its assessment by application of ACOR Algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 104, 791-803. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.115
- [21] Xiao, Y., & Cui, G. (2017). A novel Random Walk algorithm with Compulsive Evolution for heat exchanger network synthesis. *Applied Thermal Engineering*, 115, 1118-1127. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.051
- [22] Peng, F., & Cui, G. (2015). Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 78, 136-149. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.031
- [23] Pavão, L. V., Costa, C. B. B., & Ravagnani, M. A. S. S. (2018). An Enhanced Stage-wise Superstructure for Heat Exchanger Networks Synthesis with New Options for Heaters and Coolers Placement. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(7), 2560-2573. doi:10.1021/acs.iecr.7b03336
- [24] Rezaei, E., & Shafiei, S. (2008). An NLP Approach for Evolution of Heat Exchanger Networks Designed by Pinch Technology. *Iranian Journal of Chemical Engineering(IJChE)*, 5(1), 13-21
- [25] Linnhoff, B., & Ahmad, S. (1990). Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. *Computers & Chemical Engineering*, 14(7), 729-750. doi:https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)87083-2
- [26] Liu, Z., Yang, L., Yang, S., & Qian, Y. (2022). An extended stage-wise superstructure for heat exchanger network synthesis with intermediate placement of multiple utilities. *Energy*, 248, 123372. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123372