

Synthesis of Mixed materials Heat Exchanger Networks: Combining Mathematical Optimization Methods and Genetic Algorithm

Hadi Soltani^{1,*}

*¹Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
University of Maragheh, Maragheh, Iran*

Email: h.soltani@maragheh.ac.ir

Abstract

This study proposes an efficient and straightforward hybrid two-level approach for the synthesis of mixed-material heat exchanger networks (HENs). Given the inherently nonlinear and non-convex nature of the governing equations, this methodology employs a genetic algorithm (GA) at the outer level to generate diverse HEN structures. At the inner level, a mathematical optimization model determines the optimal values of continuous variables for each network generated by the algorithm, aiming to minimize the total annual cost (TAC) of the network. This inner-level optimization proceeds in two steps. The first step involves a linear programming model, operating on the principle of maximizing energy recovery, coupled with a search loop to determine stream splitting ratios. The second step implements a linear correction procedure, utilizing the outputs from the first step to identify optimal values for exchanger heat loads, split ratios, and the HEN's minimum approach temperature, thereby improving the likelihood of obtaining a lower TAC. A notable advantage of this approach is, in addition to considering non-isothermal mixing for split streams, the implicit computation of exchanger areas, which permits the consideration of various cost functions for exchangers within the TAC. The results of a case study involving two scenarios showed that the proposed approach reduced the TAC of the network by approximately 0.69% and 0.89% in the first and second scenarios, respectively, compared with the values reported in previous studies.

Keywords: Non-uniform Heat exchanger networks synthesis, Genetic algorithm, Optimization, Linear programming, Correction procedure.

طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن مبدل‌هایی از جنس‌های مختلف: تلفیق روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و الگوریتم ژنتیک

هادی سلطانی^{*}

^{*}استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

Email: h.soltani@maragheh.ac.ir

چکیده: این مطالعه یک رویکرد ترکیبی دو سطحی کارآمد و نسبتاً ساده برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با مبدل‌های حرارتی متنوع از لحاظ جنس و هزینه ساخت را ارائه می‌دهد. با توجه به ماهیت ذاتاً غیرخطی و غیرمحدب معادلات حاکم بر این مسائل، این روش از یک الگوریتم ژنتیک در سطح بیرونی برای تولید ساختارهای متنوع شبکه مبدلی استفاده می‌کند. در سطح داخلی نیز یک مدل بهینه‌سازی ریاضی، مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته هر شبکه تولیدی به وسیله الگوریتم را به هدف رسیدن به حداقل هزینه سالانه کل شبکه، پیدا می‌کند. عملیات بهینه‌سازی در سطح داخلی در دو گام انجام می‌شود. گام اول شامل یک مدل برنامه‌ریزی خطی است که بر اساس به حداکثر رساندن بازیابی حرارتی عمل می‌کند و با یک حلقه جستجو برای تعیین نسبت‌های تقسیم جریان‌ها همراه است. گام دوم یک روش اصلاح خطی را پیاده‌سازی می‌کند و از خروجی‌های گام اول برای شناسایی مقادیر بهینه بار حرارتی مبدل‌ها، نسبت تقسیم جریان‌ها و حداقل دمای شبکه، استفاده می‌کند و در نتیجه احتمال دستیابی به هزینه سالانه کل شبکه را افزایش می‌دهد. یک مزیت قابل توجه این رویکرد، علاوه بر در نظر گرفتن اختلاط غیرهم‌دما برای جریان‌های انشعابی، محاسبه ضمنی مساحت مبدل‌ها است که امکان بررسی توابع هزینه مختلف برای مبدل‌ها را در تابع هدف فراهم می‌کند. نتایج مطالعه موردی شامل دو سناریو نشان داد که رویکرد پیشنهادی توانست هزینه سالانه کل شبکه را در مقایسه با مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین، به ترتیب حدود ۰/۶۹ و ۰/۸۹ درصد در سناریوهای اول و دوم کاهش دهد.

واژگان کلیدی: طراحی شبکه‌های مبدل حرارتی غیریکنواخت، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی، روش اصلاح.

۱- مقدمه

به دلیل اهمیت مصرف بهینه انرژی در واحدهای صنعتی، کارهای مختلفی در زمینه طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی در طول چند دهه اخیر انجام شده است [۱ و ۲]. به دلیل حضور هم‌زمان متغیرهای پیوسته و گسسته، مدل‌های بهینه‌سازی حاکم بر مسائل طراحی شبکه‌های مبدلی از پیچیدگی بالایی برخوردار هستند و با افزایش تعداد جریان‌های فرآیندی، میزان این پیچیدگی نیز افزایش می‌یابد. از این‌رو، رویکردهای متعددی برای حل این مسائل توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های مبتنی بر تکنولوژی پینچ، روش‌های بهینه‌سازی ریاضی و روش‌های ترکیبی اشاره کرد. در روش‌های ترکیبی، از الگوریتم‌های تصادفی به صورت مستقل یا در ترکیب با دو رویکرد مذکور به منظور دستیابی به ساختارهای بهینه شبکه استفاده می‌شود [۳ و ۴]. از طرف دیگر در شبکه‌های مبدلی مربوط به صنایع مختلف پتروشیمی و پالایشگاهی، اغلب به دلیل ماهیت متفاوت جریان‌ها از منظر خوردگی و مقاومت در برابر فشارهای مختلف، به مبدل‌های ساخته شده از مواد خاص و گاهی گران‌قیمت، در کنار مبدل‌های معمولی، نیاز است. از این‌رو، طراحی چنین شبکه‌های مبدلی اغلب شامل مشخصات مبدل غیریکنواخت خواهد بود. این شبکه‌ها معمولاً از مبدل‌های حرارتی ساخته شده از مواد مختلف (از جمله کربن استیل (CS)، استیل ضدزنگ (SS)، تیتانیوم (TI)) تشکیل شده‌اند [۵].

از جمله اولین تحقیقات چاپ شده در این زمینه می‌توان به کارهای هال و همکاران^۱ [۶] و احمد و همکاران [۷] اشاره کرد. آن‌ها با بررسی نمودارهای هزینه، روابط کلی مشابه $C = a + b \cdot A^c$ برای هزینه خرید مبدل‌های حرارتی ارائه کردند. در این رابطه C هزینه خرید مبدل، A سطح انتقال حرارت و ضرایب a ، b و c پارامترهای ثابتی بودند. پایه و مفهومی که این رویکرد بر آن استوار بود، تأکید می‌کرد که هر جریان هم در سطح انتقال حرارت کل شبکه و در نتیجه هم در هزینه کل سرمایه شبکه، مشارکت مستقیم دارد. آن‌ها در این کار که بر پایه روش پینچ بود، از مبدل‌های حرارتی مختلف، از جنس‌های متفاوت و تحت شرایط فشاری گوناگون، در ساختار شبکه مبدلی، استفاده کردند [۶ و ۷].

با این حال، جگده و پولی^۲ [۵] ادعا کردند که این روش دارای نقاط ضعفی است، به طوری که استفاده عملی از آن در طراحی شبکه مبدلی، محدودیت زیادی ایجاد می‌کرد. آن‌ها نشان دادند که توزیع مساحت و تعداد واحدها بین مشخصات مبدل، مهم است؛ چراکه می‌تواند به طور قابل توجهی بر هزینه سرمایه شبکه تأثیر بگذارد. از این‌رو برآورد مساحت و توزیع واحدها بین مشخصات مبدل در مرحله هدف‌گذاری ضروری بود. بنابراین این محققان رویکردی را برای اصلاح در روش‌های هدف‌گیری طراحی پینچ، جهت اجازه دادن به مشخصات مبدل غیریکنواختی که می‌توانست تأثیر عمده‌ای بر هزینه سرمایه یک شبکه مبدلی داشته باشد، در کنار بهره‌گیری از جدول طبقه‌بندی مبدل به عنوان ابزاری مفید برای کمک به طراحی شبکه مبدلی، پیشنهاد دادند [۵]. در ادامه حجتی و همکاران [۸] با تکمیل روش‌های ارائه شده در مراجع [۵ و ۶] یک رویکرد ساده را به صورت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط^۳ (MINLP) جهت محاسبه هزینه شبکه مبدلی با مبدل‌های غیریکنواخت، فرمول‌بندی کردند. آن‌ها برای این کار از سوپراساختار ارائه شده توسط یی و گراسمن^۴ [۹] بهره بردند. ایده اصلی این تحقیق این بود که هزینه کل یک مبدل حرارتی منفرد به دو

¹ Hall et al.

² Jegede and Polley

³ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)

⁴ Yee and Grossmann

عنصر یعنی هزینه لوله و هزینه پوسته قابل تجزیه است. بنابراین با استفاده از متغیرهای باینری و ارزیابی شرایط فیزیکی جریان‌ها، مسیر مناسب عبور جریان‌ها در داخل لوله و پوسته قابل تعیین خواهد بود. در این حالت، پوسته و لوله می‌تواند از جنس ترکیبی باشد و بنابراین می‌توان از مدل‌های هزینه متفاوتی برای برآورد هزینه هر مبدل، استفاده کرد. از این رو آن‌ها این مهم را در داخل تابع هدف کلی طراحی شبکه مبدلی که رسیدن به حداقل هزینه سالانه بود، در نظر گرفتند. پنجه‌شاهی و همکاران [۱۰] یک رویکرد بهینه‌سازی هزینه کل بر اساس روش پینچ ارائه کردند که تأثیر هزینه خرید از فروشندگان مختلف در زمان‌های مختلف را بر تعدد قوانین هزینه با استفاده از روش‌های تجزیه کلی و جزئی در نظر می‌گرفت. از جمله، مزیت‌های مهم این روش، حذف مبدل‌های مختلط یا کاهش تعداد آن‌ها به تنها یک واحد در شبکه، بیان شده بود که باعث ایجاد شبکه‌ای ساده با هزینه‌های نگهداری کمتر می‌شد. بر اساس ادعای نویسندگان تجزیه جزئی همیشه امکان‌پذیر نبوده، اما معمولاً نتایج حاصل از آن بهتر از نتایج تجزیه کامل بود. همچنین روش تجزیه کلی و جزئی قابلیت اطمینان روش ادغام کامل را کاهش نمی‌داد؛ بلکه این روش می‌توانست برای ارائه گزینه‌های اضافی در روند طراحی شبکه با جریان‌های ویژه استفاده گردد. سرنای گونزالز^۱ و همکاران [۱۱] الگوریتمی برای حل مسائل طراحی شبکه‌های مبدلی با هدف‌گذاری مساحت و هزینه سرمایه‌گذاری با در نظر گرفتن هزینه‌های متفاوت برای مبدل‌ها مطابق با جنس آن‌ها بر اساس معادلات هزینه ارائه شده در [۶]، ارائه کردند. این الگوریتم هدف‌گیری مساحت بر اساس مفهوم مشارکت اختلاف دما (ΔT)^۲ برای هر جریان استوار بود. فیهگ^۳ و همکاران [۱۲] از یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی جهت بهینه‌سازی شبکه‌های مبدلی که می‌توانست انواع مبدل‌های حرارتی را در نظر بگیرد، استفاده کردند. سان^۴ و همکاران [۱۳] رویکردی هشت مرحله‌ای بر پایه سوپرهدف‌گذاری دمای جریان در مقابل نمودار آنتالپی جهت بهینه‌سازی هزینه شبکه مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن چندین یوتیلیتی و انواع مختلف مبدل‌های حرارتی، ارائه کردند. دلیل استفاده از این روش محدودیت‌های حاکم بر روش هدف‌گیری بر اساس منحنی‌های مرکب، اعلام شده بود. در نهایت کریمی و همکاران [۱۴] به بررسی هزینه کل سالانه مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله با جنس‌های مختلف بر اساس سه الگوریتم بهینه‌سازی به نام‌های ترکیب الگوریتم ژنتیک-ازدحام ذرات، الگوریتم جهش قورباغه مختلط^۵ (SFLA) و کلونی مورچگان پرداختند. متغیرهای مستقل استفاده شده در این تحقیق قطر بیرونی لوله، قطر پوسته و فاصله بافل مرکزی بود. در ادامه آن‌ها این روش را جهت کاهش هزینه سالانه شبکه مبدل‌های حرارتی که در آن از مبدل‌های حرارتی با جنس‌های مختلف استفاده شده بود، با استفاده از دو روش تجزیه کلی و تجزیه جزئی [۱۵]، و طراحی دقیق برای هر مبدل حرارتی [۱۶] استفاده کردند.

در این تحقیق، با بسط روش ارائه‌شده در مرجع [۳ و ۱۷] یک روش ترکیبی ساده و مبتنی بر مدل‌های خطی برای طراحی شبکه‌های مبدل حرارتی با جنس‌های مختلف ارائه شده است. برخلاف روش‌های پیشین که شبکه را به زیرشبکه‌های مربوط به جریان‌های خورنده و غیرخورنده تقسیم می‌کنند، روش پیشنهادی کل شبکه را به صورت یکپارچه بررسی کرده و توابع هزینه متفاوت مبدل‌ها را در تابع هدف لحاظ می‌کند. همچنین،

¹ Serna-González

² ΔT -contribution

³ Fieg

⁴ Sun

⁵ Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA)

اختلاط غیرهم‌دما در جریان‌های انشعابی درنظر گرفته شده و حداقل اختلاف دمای شبکه، برخلاف روش‌های پیشین، به‌جای یک مقدار ثابت به‌صورت بهینه و با هدف دستیابی به حداقل هزینه سالانه کل^۱ (TAC) شبکه تعیین می‌شود.

۲- تعریف مسئله

مسئله طراحی شبکه‌های مبدل حرارتی غیریکنواخت به‌صورت زیر تعریف می‌شود: مجموعه‌ای از جریان‌های گرم و سرد فرآیندی با دماهای ورودی و خروجی مشخص، به‌همراه نرخ جریان ظرفیت گرمایی، ضریب انتقال حرارت و جنس موردنیاز هر جریان از دیدگاه ملاحظات خوردگی، به‌عنوان داده‌های ورودی درنظر گرفته می‌شوند. علاوه‌براین، یوتیلیتی‌های گرم و سرد به‌عنوان منابع خارجی تأمین گرمایش و سرمایش، در صورت نیاز، در دسترس هستند. همچنین، توابع هزینه مربوط به هر یک از جنس‌های قابل استفاده در سمت لوله و پوسته مبدل‌ها نیز مشخص می‌باشند. هدف اصلی، یافتن ساختار بهینه شبکه مبدل‌های حرارتی با انتخاب مناسب جنس و آرایش مبدل‌ها برای دستیابی به حداقل هزینه سالانه کل است. این هزینه شامل هزینه مصرف یوتیلیتی به‌همراه سرمایه سالیانه شده خرید مبدل‌ها است.

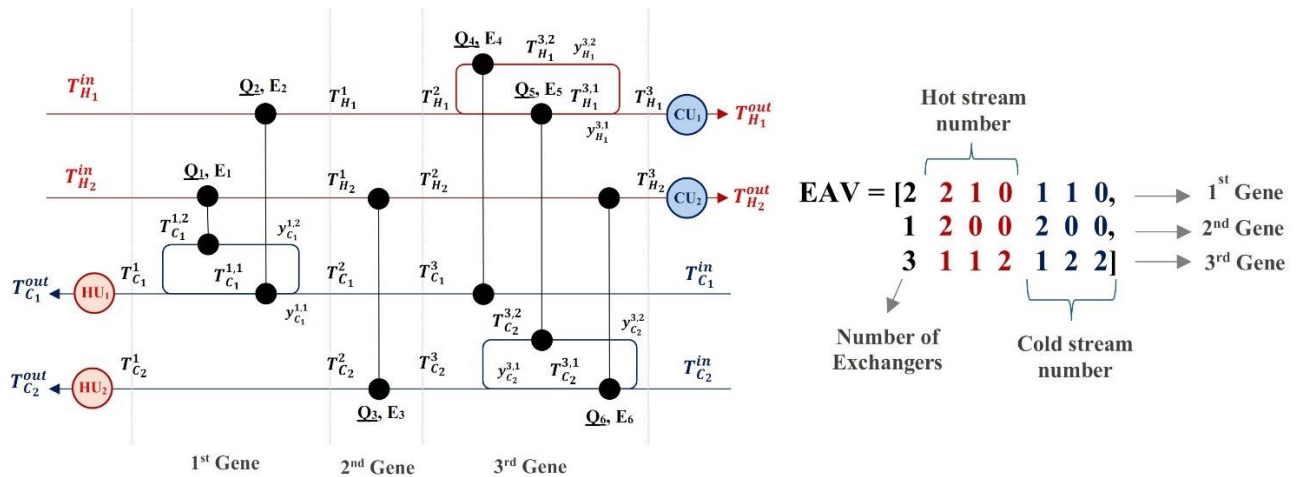
۳- نحوه تولید شبکه‌های مبدلی به‌سیله الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق هر ساختار شبکه مبدلی توسط الگوریتم ژنتیک و با استفاده از نمایش گره‌ای^۲ به‌صورت یک بردار به‌نام بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها^۳ (EAV)، ایجاد می‌شود. هر ساختار از چندین بخش با نام ژن تشکیل شده است که هر یک دربرگیرنده آدرس حداقل یک و حداکثر سه مبدل به‌صورت کدهای عددی است. علت درنظر گرفتن این محدوده برای تعداد مبدل‌ها در هر ژن، جلوگیری از پیچیده شدن ساختارهای شبکه مبدلی ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد. تعداد ژن‌ها تابعی از ابعاد شبکه مبدل‌های حرارتی مورد مطالعه است [۴ و ۱۷] و به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی الگوریتم درنظر گرفته می‌شود. شکل (۱) نمونه‌ای از یک ساختار شبکه مبدلی را به‌همراه بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها نشان می‌دهد که از سه ژن تشکیل شده و حاوی شش مبدل است. همان‌طور که از شکل (۱) مشخص است، در بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها، هر ژن از هفت درایه تشکیل شده است. درایه اول تعداد مبدل‌های موجود در ژن را مشخص می‌کند. سه درایه بعدی (درایه‌های دوم تا چهارم) شماره جریان‌های گرم و سه درایه آخر (درایه‌های پنجم تا هفتم) شماره جریان‌های سرد را نشان می‌دهند. مقدار صفر در هر درایه بیانگر عدم وجود جریان متناظر است. همچنین، تکرار شماره یک جریان در یک ژن نشان‌دهنده انشعاب آن جریان می‌باشد. برای مثال، در شکل (۱)، مقادیر ۱، ۱ و ۲ در بخش مربوط به جریان‌های گرم ژن سوم، بیانگر انشعاب جریان H₁ به دو شاخه است، درحالی‌که جریان H₂ مستقیماً وارد مبدل سوم در این ژن شده است.

¹ Total Annual Cost (TAC)

² node representation

³ Exchanger address vector (EAV)



شکل ۱. نمونه‌ای از شبکه مبدلی تولیدی توسط الگوریتم ژنتیک با ۶ مبدل و ۳ ژن و بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها.
Figure 1. A typical HEN generated by the GA with 6 exchangers, 3 genes, and its exchanger address vector (EAV).

لازم به ذکر است در تمامی شبکه‌های تولیدشده توسط الگوریتم ژنتیک، در انتهای هر جریان گرم و سرد به ترتیب یک مبدل یوتیلیتی سرد و یک مبدل یوتیلیتی گرم در نظر گرفته می‌شود که تنها در صورت عدم دستیابی جریان‌های فرآیندی به دمای هدف، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین نیازی به تعریف آن‌ها در بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها نیست.

از مهم‌ترین مزایای این روش آدرس‌دهی مبدل‌ها و تولید ساختارهای شبکه، می‌توان به سادگی پیاده‌سازی در عملگرهای الگوریتم ژنتیک، قابلیت تولید ساختارهای متنوع با پیچیدگی کنترل‌شده، و امکان تعیین آسان‌تر جنس مبدل‌ها (از منظر خوردگی) برای تبادل حرارت میان جریان‌های گرم و سرد، اشاره کرد. در این رویکرد، ابتدا نسل اول ساختارهای شبکه مبدلی، همانند شکل (۱)، به صورت تصادفی تولید می‌شوند. سپس، هر ساختار برای محاسبه هزینه سالانه کل (به عنوان تابع هدف) به مدل بهینه‌سازی ریاضی در سطح درونی ارسال می‌شود که جزئیات آن در بخش آتی تشریح خواهد شد. در ادامه، الگوریتم ژنتیک با بهره‌گیری از مقادیر تابع هدف و به کارگیری عملگرهای خود شامل تولیدمثل، تقاطع و جهش، ساختارهای مبدلی نسل‌های بعدی را برای دستیابی به ساختار بهینه تولید می‌کند. جزئیات عملکرد این عملگرها در مرجع [۱۷] به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است.

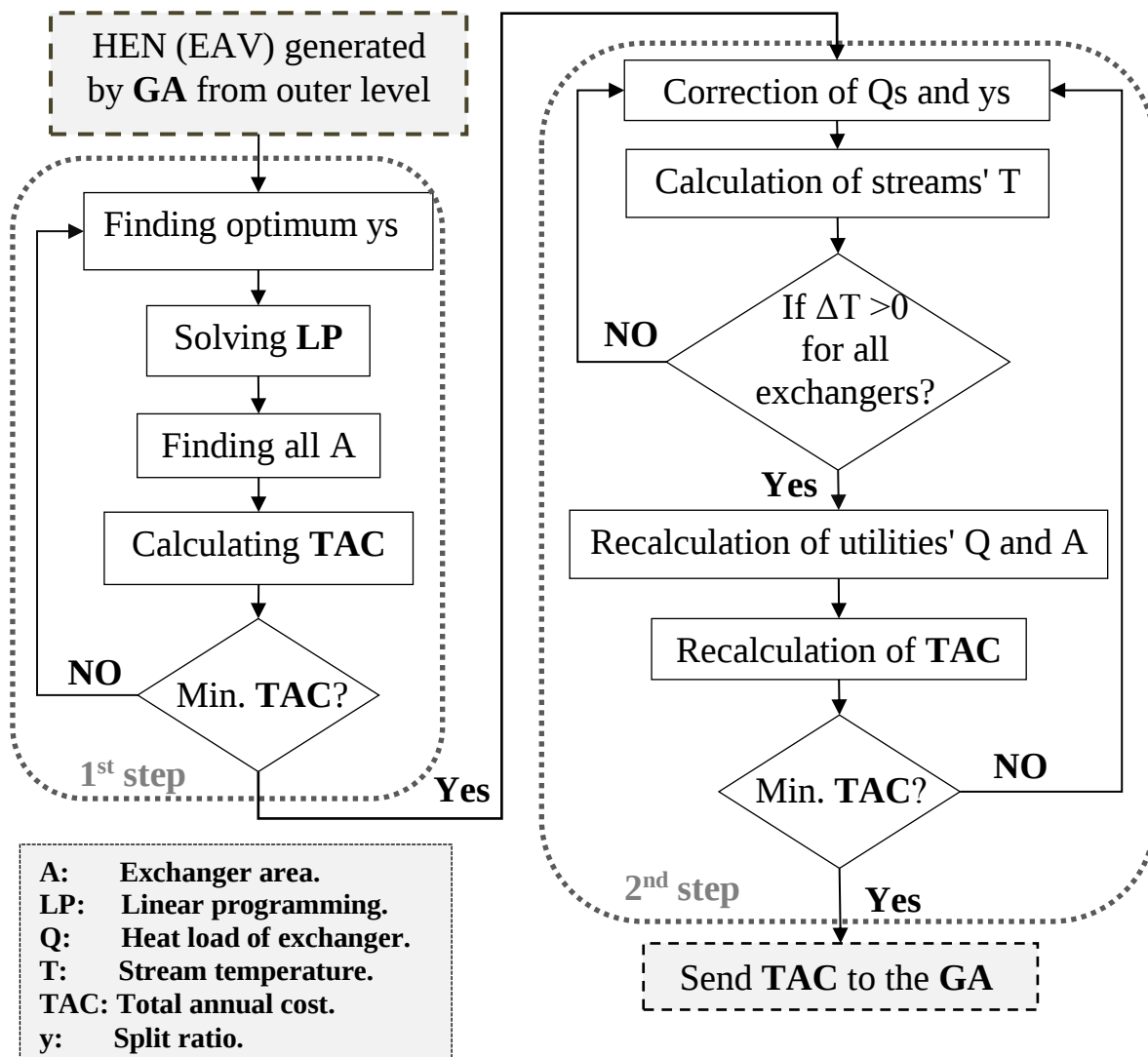
۴- نحوه عملکرد مدل بهینه‌سازی ریاضی

با مشخص شدن ساختار هر شبکه در سطح بیرونی، مدل ریاضی حاکم بر متغیرهای پیوسته (شامل دمای جریان‌ها (T)، بار حرارتی (Q) و سطح مبدل‌ها (A)، نسبت تقسیم جریان‌ها (y) و حداقل اختلاف دمای نزدیکی^۱ (ΔT_{min})) به دلیل وجود معادلات غیرخطی انتقال حرارت و موازنه انرژی، به فرم یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی^۲ (NLP) در می‌آید. در روش حاضر، علاوه بر این غیرخطی بودن، در نظر گرفتن توابع هزینه متفاوت برای مبدل‌ها در تابع TAC، ساختار مدل را نسبت به مرجع [۳ و ۱۷] پیچیده‌تر می‌کند و نیازمند ایجاد

^۱ Minimum approach temperature

^۲ Non-Linear Programming (NLP)

ارتباط بین ساختار شبکه و تابع هزینه متناظر با جنس مبدل‌ها است. برای غلبه بر پیچیدگی‌های محاسباتی این مدل و بهبود همگرایی به سمت جواب بهینه، در این پژوهش از یک مدل بهینه‌سازی ریاضی استفاده شده است که فلوچارت آن در شکل (۲) ارائه شده است. همان‌طور که از شکل (۲) مشخص است، این مدل متشکل از دو گام می‌باشد. در هر گام یک حلقه جستجوی بیرونی جهت یافتن مقادیر متغیرهای غیرخطی‌ساز مدل، در نظر گرفته شده است. گام اول این روش متشکل از مدل برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP) همراه با یک حلقه جستجو است. این حلقه برای یافتن مقادیر بهینه y ها در بازه تغییرات [۰/۰-۰۱/۹۹] استفاده می‌شود. مدل LP نیز بر اساس رسیدن به حداکثر بازیابی حرارتی کار می‌کند. گام دوم نیز متشکل از یک فرآیند اصلاح خطی و یک حلقه جستجو برای یافتن مقادیر بهینه بار حرارتی مبدل‌های فرآیندی و y ها به منظور رسیدن به حداقل TAC شبکه می‌باشد. لازم به ذکر است مقدار بهینه ΔT_{min} شبکه نیز در انتهای گام دوم مدل بهینه‌سازی ریاضی حاصل خواهد شد.



شکل ۲. فلوچارت مدل بهینه‌سازی ریاضی.

Figure 2. Flowchart of mathematical optimization model.

¹ Linear Programming (LP)

۴-۱- عملکرد مدل LP

تابع هدف مدل LP با استفاده از یک تابع چندهدفه توسعه داده شد تا ضمن کاهش پینچ‌شدگی برخی مبدل‌ها در $\Delta T_{\min}$ ، بازیافت حداکثری انرژی به‌طور هم‌زمان حاصل شود. این تابع به‌صورت معادله (۱) تعریف می‌شود:

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

که در آن Q_k بار حرارتی مبدل‌ها و NPE و ΔT نیز به‌ترتیب بیانگر تعداد مبدل‌های فرآیندی و اختلاف دما بین جریان‌های گرم و سرد در اطراف هر مبدل می‌باشد. اگر تنها بخش اول تابع هدف ارائه‌شده در معادله (۱) مد نظر قرار گیرد، با هدف بهینه‌سازی بازیابی حرارتی، مقادیر ΔT به‌سمت صفر میل می‌کنند که این امر به افزایش سطوح انتقال حرارت و در نتیجه افزایش سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای خرید مبدل‌ها منجر می‌شود. برای جلوگیری از افزایش غیرمنطقی سطوح انتقال حرارت، در کنار ترم اول، ترم دوم با ضریب تأثیری مشخص برای مقادیر ΔT در تابع هدف لحاظ شده است. ضریب تأثیر، SF ، باید به‌اندازه‌ای بزرگ انتخاب شود که ضمن کنترل ابعاد مبدل‌ها، هدف اصلی بهینه‌سازی (بهینه‌سازی بازیابی حرارتی) تحت تأثیر قرار نگیرد. در این پژوهش مطابق مرجع [۳]، مقدار ۲۰۰۰ برای SF در نظر گرفته شده است. قیدهای مساوی و نامساوی مدل LP با توجه به شبکه مبدلی نشان داده شده در شکل (۱) بدین صورت خواهد بود:

الف: موازنه انرژی حول مبدل‌های فرآیندی (در صورت وجود انشعاب، این معادلات غیرخطی خواهند بود):

$$\begin{aligned} E_1: T_{H_2}^{in} - Q_1/F_{H_2} - T_{H_2}^1 &= 0, & T_{C_1}^2 + Q_1/(y_{C_1}^{1,2} \cdot F_{C_1}) - T_{C_1}^{1,2} &= 0 \\ E_3: T_{H_2}^2 - Q_3/F_{H_2} - T_{H_2}^2 &= 0, & T_{C_2}^3 + Q_3/F_{C_2} - T_{C_2}^2 &= 0 \\ E_4: T_{H_1}^2 - Q_4/(y_{H_1}^{3,2} \cdot F_{H_1}) - T_{H_1}^{3,2} &= 0, & T_{C_1}^{in} + Q_4/F_{C_1} - T_{C_1}^3 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

برای بقیه مبدل‌های فرآیندی نیز معادلات مشابهی را می‌توان تعریف کرد.

ب: موازنه انرژی برای مبدل‌های یوتیلیتی گرم و سرد (معادلات خطی):

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

برای سایر مبدل‌های یوتیلیتی نیز می‌توان معادلات مشابهی در نظر گرفت.

ج: موازنه جرم در تقسیم‌کننده‌ها (معادلات خطی):

$$y_{C_1}^{1,2} + y_{C_1}^{1,1} = 1, \quad y_{H_1}^{3,2} + y_{H_1}^{3,1} = 1, \quad y_{C_2}^{3,2} + y_{C_2}^{3,1} = 1 \quad (4)$$

د: افزایش یا کاهش متوالی دمای جریان‌ها (نامعادلات خطی):

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

برای سایر جریان‌ها نیز چنین روابطی حاکم است.

ه: رعایت بزرگ‌تر یا مساوی بودن اختلاف دما بین جریان‌های گرم و سرد در اطراف مبدل‌ها از $\Delta T_{\min}$ (نامعادلات خطی):

$$\begin{aligned} E_1: \Delta T_{1,1} &= T_{H_2}^{in} - T_{C_1}^{1,2} \geq \Delta T_{\min}, \quad \Delta T_{1,2} = T_{H_2}^1 - T_{C_1}^2 \geq \Delta T_{\min} \\ E_3: \Delta T_{2,1} &= T_{H_2}^1 - T_{C_2}^2 \geq \Delta T_{\min}, \quad \Delta T_{2,2} = T_{H_2}^2 - T_{C_2}^3 \geq \Delta T_{\min} \end{aligned} \quad (6)$$

برای سایر مبدل‌های نیز روابط مشابهی می‌توان در نظر گرفت.

و: موازنه انرژی حول نقاط اختلاط (معادلات غیرخطی):

$$\begin{aligned} T_{C_1}^1 &= y_{C_1}^{1,2} \cdot T_{C_1}^{1,2} + y_{C_1}^{1,1} \cdot T_{C_1}^{1,1} \\ T_{H_1}^3 &= y_{H_1}^{3,2} \cdot T_{H_1}^{3,2} + y_{H_1}^{3,1} \cdot T_{H_1}^{3,1} \\ T_{C_2}^3 &= y_{C_2}^{3,2} \cdot T_{C_2}^{3,2} + y_{C_2}^{3,1} \cdot T_{C_2}^{3,1} \end{aligned} \quad (7)$$

در معادلات (۲) الی (۷)، $T_{C_j}^{out}$ و $T_{C_j}^{in}$ ، $T_{H_i}^{out}$ ، $T_{H_i}^{in}$ ، به ترتیب بیانگر دمای ورودی و خروجی جریان‌های فرآیندی گرم i و سرد j می‌باشند، $T_{C_j}^g$ و $T_{H_i}^g$ به ترتیب نشان‌دهنده دمای جریان گرم i و سرد j خروجی از ژن گام و $T_{C_j}^{g,s}$ و $T_{H_i}^{g,s}$ به ترتیب بیانگر دمای جریان‌های گرم i و سرد j انشعاب s واقع در ژن گام می‌باشند. Q_{CU_i} و Q_{HU_j} به ترتیب بیانگر بار حرارتی یوتیلیتی سرد i و گرم j ؛ F_{C_j} و F_{H_i} به ترتیب بیانگر سرعت جریان ظرفیت حرارتی جریان گرم i و سرد j می‌باشند. در این معادلات $i \in NH$ ، $j \in NC$ ، $g \in NG$ و $s \in \{1, 2\}$ می‌باشد که در آن NH ، NC و NG به ترتیب نشان‌دهنده تعداد جریان‌های گرم، تعداد جریان‌های سرد و تعداد ژن‌ها است. با مشخص شدن مقادیر نسبت تقسیم جریان‌ها در حلقه جستجوی خارجی، قیود ارائه‌شده در معادلات (۲) تا (۷)، به همراه تابع هدف در معادله (۱)، در گام نخست به صورت یک مدل LP حل می‌شوند. خروجی این مدل شامل بارهای حرارتی مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی و همچنین دمای جریان‌ها است. در ادامه، با استفاده از دماهای به دست آمده از مدل LP، اختلاف دمای لگاریتمی (LMTD) و سطح انتقال حرارت هر یک از مبدل‌ها مطابق با معادلات (۸) و (۹) محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} LMTD &= (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2), \quad \text{if } \Delta T_1 \neq \Delta T_2 \\ LMTD &= (\Delta T_1 + \Delta T_2) / 2, \quad \text{if } \Delta T_1 = \Delta T_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A_k &= Q_k / (U_k \cdot LMTD_k), \quad U_k = \left(1/h_{H_i} + 1/h_{C_j}\right)^{-1} \\ A_{CU_i} &= Q_{CU_i} / (U_{CU_i} \cdot LMTD_{CU_i}), \quad U_{CU_i} = \left(1/h_{H_i} + 1/h_{CU_i}\right)^{-1} \\ A_{HU_j} &= Q_{HU_j} / (U_{HU_j} \cdot LMTD_{HU_j}), \quad U_{HU_j} = \left(1/h_{HU_j} + 1/h_{C_j}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن A_k ، A_{CU_i} و A_{HU_j} به ترتیب بیانگر سطح انتقال حرارت مبدل فرآیندی، یوتیلیتی سرد i ام و یوتیلیتی گرم j ام می‌باشد. علاوه بر این h و U به ترتیب بیانگر ضریب انتقال حرارت فیلمی و ضریب انتقال حرارت کلی مبدل می‌باشد. در نهایت TAC شبکه به عنوان تابع هدف اصلی محاسبه از طریق معادله (۱۰) محاسبه می‌شود که هدف کمینه کردن آن می‌باشد.

$$\begin{aligned} \min. \quad TAC &= AF \cdot \left(\sum_k \sum_c (a_c + b_c \cdot A_{E_k}^{\beta_c}) + \sum_j \sum_c (a_c + b_c \cdot A_{CU_j}^{\beta_c}) \right. \\ &\quad \left. + \sum_i \sum_c (a_c + b_c \cdot A_{CU_i}^{\beta_c}) \right) + \sum_i C_{CU} Q_{CU_i} + \sum_j C_{HU} Q_{HU_j}; \\ &\quad i \in NH, j \in NC, k \in NPE \end{aligned} \quad (10)$$

$$AF = \begin{cases} \frac{(1+I)^n - 1}{(1+I)^n \cdot I} & \text{if } I \neq 0 \\ 1 & \text{if } I = 0 \end{cases}$$

در این معادله، C_{CHU} و C_{CCU} به ترتیب بیانگر هزینه یوتیلیتی سرد و گرم، AF ، n و I به ترتیب نشان دهنده ضریب تبدیل هزینه سرمایه گذاری به هزینه سالانه، طول عمر شبکه و نرخ بهره می باشد. همچنین پارامترهای a ، b و β به ترتیب بیانگر هزینه ثابت، ضریب و توان هزینه مبدل ها هستند و اندیس c نوع هزینه پردازی را برای هر مبدل مشخص می کند. تعیین این مقادیر ثابت، وابسته به جنس مبدل است که خود بر اساس نوع جریان های گرم و سرد (مشخص شده در بردار آدرس دهی مبدل ها) انتخاب می شود.

مقدار TAC محاسبه شده در معادله (۱۰)، معیاری برای عددی مقادیر نسبت تقسیم جریان ها در حلقه جستجوی بیرونی گام اول مدل بهینه سازی ریاضی در نظر گرفته می شود. عملیات در گام اول تا رسیدن به مقدار حداقل ممکن TAC تکرار می شود.

به دلیل عدم لحاظ هم زمان هزینه های سرمایه گذاری و هزینه های عملیاتی سالانه در گام نخست، خروجی های این مرحله مقادیر بهینه نهایی را ارائه نمی دهند. از این رو، برای دستیابی به جواب های بهینه، نتایج گام اول به گام دوم که یک فرآیند تصحیح می باشد، ارسال می گردد.

۴-۲- نحوه عملکرد فرآیند تصحیح

این گام با هدف دستیابی به کم ترین هزینه سالانه کل شبکه، از طریق اصلاح هدفمند بارهای حرارتی مبدل های فرآیندی (Q) و نسبت تقسیم (γ) جریان های به دست آمده از گام اول، عمل می کند. نحوه عملکرد این گام به صورت مراحل زیر است:

* ابتدا مقادیر Q ها و γ ها از گام نخست به گام دوم ارسال می شود.

* سپس حدود تغییرات γ ها مطابق گام اول و حدود تغییرات Q هر مبدل فرآیندی به صورت $[0 - Q_{max}]$ در نظر گرفته می شود. مقدار Q_{max} با توجه به سرعت جریان و ظرفیت گرمایی جریان ها در هر مبدل، مطابق معادله (۱۱) تعریف می شود.

$$Q_{max} = \min \{ F_{H_i} \cdot (T_{H_i}^{in} - T_{H_i}^{out}), F_{C_j} \cdot (T_{C_j}^{out} - T_{C_j}^{in}) \} \quad (11)$$

* در ادامه تکرار فرآیند جستجو به هدف رسیدن به مقادیر بهینه TAC شروع می شود که شامل:

- I. انتخاب مقادیر جدید برای Q ها و γ ها در محدوده های مجاز تعریف شده،
- II. تشکیل مجدد و حل دستگاه معادلات خطی مطابق معادلات (۲) و (۷)، بر اساس مقادیر جدید Q ها و γ ها، به منظور محاسبه دمای جریان ها،
- III. محاسبه ΔT_1 و ΔT_2 در اطراف هر مبدل فرآیندی،
- IV. ادامه مراحل در صورتی که برای همه مبدل ها شرط $\Delta T \geq 0$ برقرار باشد، در غیر این صورت برگشت به مرحله (I)،

V. محاسبه بار حرارتی مبدل های یوتیلیتی از طریق حل معادلات مشابه (۳)،

VI. محاسبه LMTD و سطح انتقال حرارت مبدل ها،

VII. محاسبه TAC و مقایسه آن با بهترین مقدار به دست آمده و در صورت بهبود، به روزرسانی جواب برتر؛

سپس بازگشت به مرحله (I) برای ادامه جست‌وجو.

مقدار TAC به‌دست‌آمده در هر تکرار، به‌عنوان معیار ارزیابی مجموعه مقادیر انتخاب‌شده برای Q ها و γ ها در حلقه جست‌وجوی بیرونی گام دوم مدل بهینه‌سازی ریاضی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند تا دستیابی به کم‌ترین مقدار TAC ادامه می‌یابد. در نهایت، مقدار بهینه TAC به‌عنوان تابع هزینه شبکه به الگوریتم ژنتیک منتقل می‌شود. همچنین، کم‌ترین مقدار ΔT محاسبه‌شده در این مرحله، به‌عنوان $\Delta T_{\min}$ شبکه در نظر گرفته می‌شود.

با این رویکرد، مسائل طراحی شبکه‌های مبدلی با مبدل‌هایی از جنس‌های مختلف، به‌جای حل مستقیم در قالب یک مدل پیچیده MINLP، به یک چارچوب ترکیبی شامل GA-مدل بهینه‌سازی ریاضی، تبدیل می‌شوند. ساختار ساده‌تر مدل بهینه‌سازی در هر گام، ضمن کاهش پیچیدگی محاسباتی، امکان جست‌وجوی موثرتر فضای جواب و افزایش احتمال دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت بالا را فراهم می‌کند. عملکرد این رویکرد پیشنهادی در بخش بعدی و بر روی یک مورد مطالعاتی با دو سناریو بررسی شد.

۵- مورد مطالعاتی

این مطالعه شامل پنج جریان گرم و چهار جریان سرد فرآیندی، به‌همراه یک جریان یوتیلیتی گرم و یک جریان یوتیلیتی سرد است که پیش‌تر در مرجع [۱۰] بررسی شده است. اطلاعات شبکه و تابع هزینه مبدل‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. در مرجع [۱۰]، جریان‌های گرم H_3 و H_4 و جریان‌های سرد C_1 و C_4 به‌عنوان جریان‌های خورنده معرفی شده‌اند و برای مبدل‌های مرتبط با این جریان‌ها، استفاده از فولاد ضدزنگ (SS) یا تیتانیوم (TI) در نظر گرفته شده است؛ درحالی‌که برای سایر جریان‌ها، فولاد کربنی (CS) مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس و مطابق با مرجع [۱۰]، دو سناریو در این مطالعه در نظر گرفته شد: در سناریوی اول، SS و در سناریوی دوم، TI به‌عنوان جنس مبدل‌های مرتبط با جریان‌های خورنده انتخاب شد. همچنین، به‌منظور حفظ یکسانی فرضیات و مبانی محاسباتی با مطالعه مرجع [۱۰] و امکان مقایسه مستقیم نتایج، مقاومت حرارتی جداره لوله ناشی از تفاوت جنس مواد در محاسبات ضریب کلی انتقال حرارت به‌صورت مستقل لحاظ نشده است؛ زیرا در مطالعه مرجع نیز گزارشی از در نظر گرفتن این مقاومت ارائه نشده است.

با توجه به بزرگی مسئله، تعداد ژن‌های در نظر گرفته‌شده برای تولید ساختارهای شبکه مبدلی توسط الگوریتم ژنتیک، ۷ ژن بود. همچنین، اندازه جمعیت اولیه و تعداد نسل‌ها پس از بررسی چندین حالت و با در نظر گرفتن هم‌زمان کیفیت جواب و زمان محاسباتی، هر دو برابر با ۵۰ تعیین شدند. زمان موردنیاز برای دستیابی به راه‌حل مطلوب در هر دو سناریو حدود ۱۹۶ دقیقه بود.

شکل (۳) روند عملکرد الگوریتم ژنتیک در فرآیند جست‌وجوی شبکه بهینه را برای هر دو سناریو نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداقل و متوسط هزینه در طول نسل‌ها روندی نزولی داشته و در نسل‌های پایانی، بهترین جواب در هر دو سناریو تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. این رفتار نشان می‌دهد که الگوریتم در نسل‌های پایانی به ناحیه جواب بهینه نزدیک شده و تعداد جمعیت و نسل‌های انتخاب‌شده، با توجه به موازنه میان کیفیت جواب و زمان محاسباتی، برای حل مسئله موردنظر مناسب بوده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به شبکه مبدلی مورد مطالعاتی

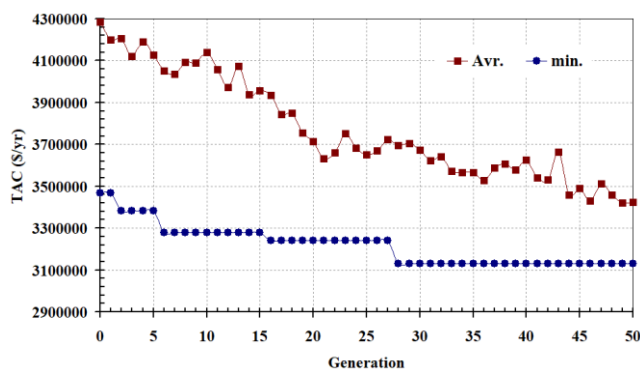
Table 1. Data for the Case Study Network.

Stream	T^{in} (°C)	T^{out} (°C)	F (kW. K ⁻¹)	h (kW.m ⁻² K ⁻¹)
H ₁	120	65	50	0.50
H ₂	80	50	300	0.25
*H ₃	135	110	290	0.3
*H ₄	220	95	20	0.18
H ₅	135	105	260	0.25
*C ₁	65	90	150	0.27
C ₂	75	200	140	0.25
C ₃	30	210	100	0.15
*C ₄	60	140	50	0.45
Steam	250	250		0.35
Cooling Water	15	15		0.2

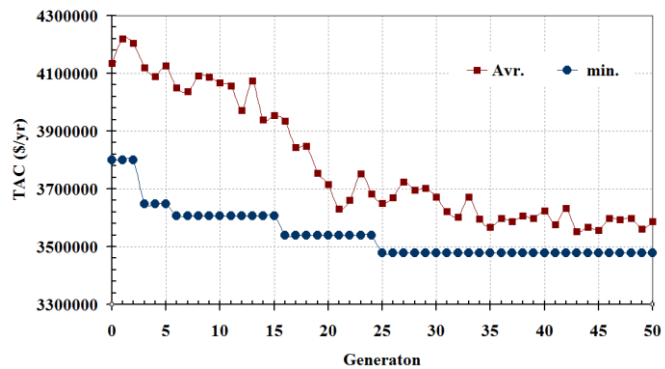
**Heat exchanger capital cost based on shell/tube material (\$) (A: m²):
 CS/CS: 30800 + 750 A^{0.81} SS/SS: 30800 + 1644 A^{0.81}
 TI/TI: 30800 + 4407 A^{0.81} CS/SS or SS/CS: 30800 + 1339 A^{0.81}
 CS/TI or TI/CS: 30800 + 3349 A^{0.81} SS/TI or TI/SS: 30800 + 3749 A^{0.81}
 Hot utility cost (\$ kW⁻¹ y⁻¹): 120 Cold utility cost (\$ kW⁻¹ y⁻¹): 10
 Plan lifetime (y): 6 Interest rate (%): 10

* Corrosive streams

**Abbreviations: CS: Carbon Steel, SS: Stainless Steel, TI: Titanium;



(a) 1st Scenario

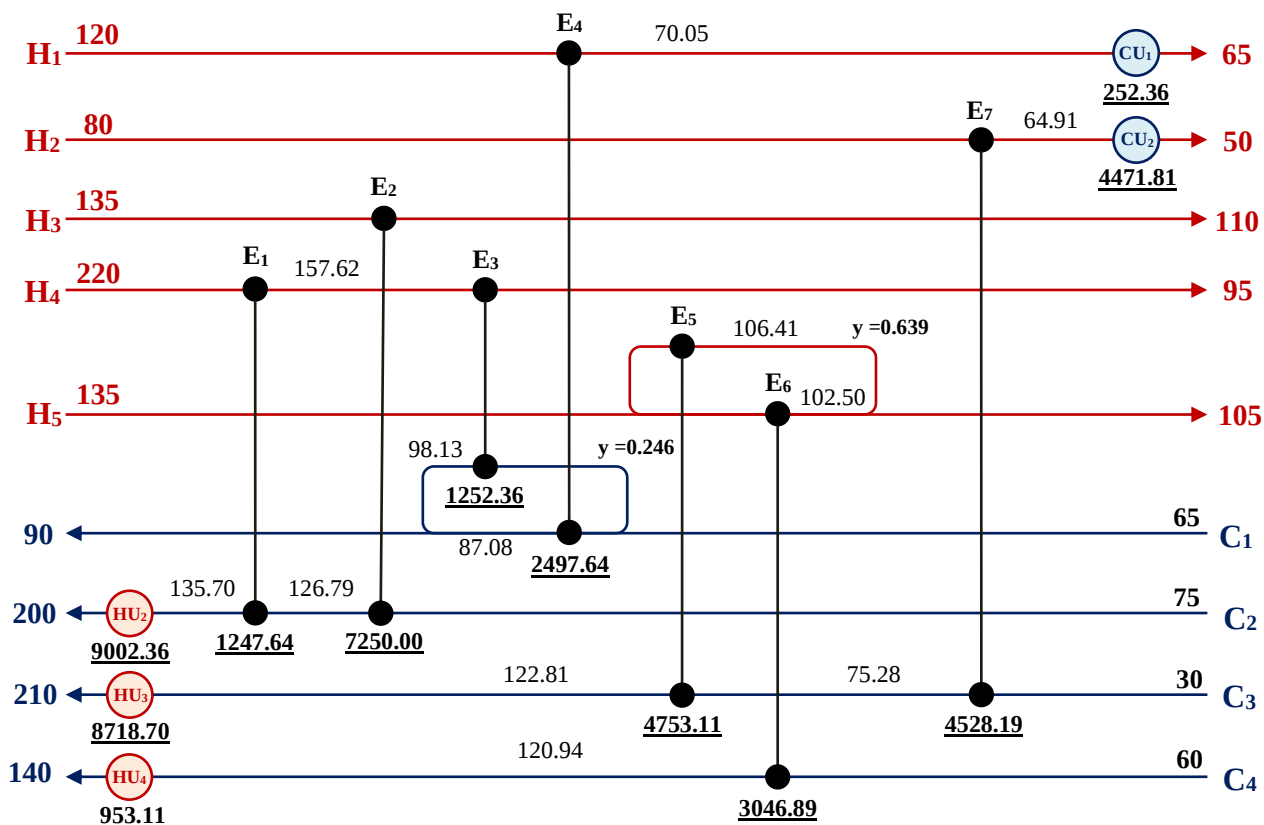


(b) 2nd Scenario

شکل ۳. عملکرد الگوریتم ژنتیک در پیدا کردن شبکه بهینه برای سناریوهای اول و دوم

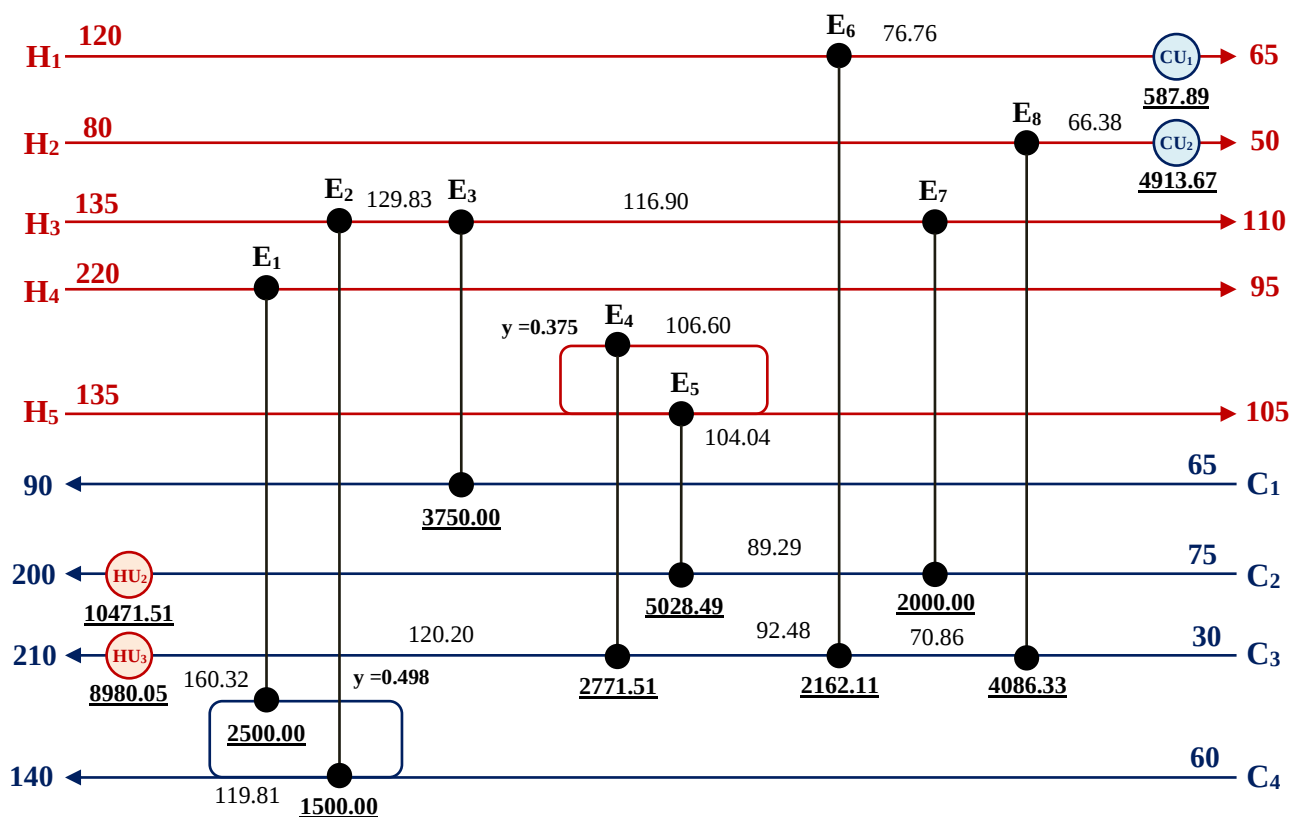
Figure 3. Performance of the GA in finding the optimal HEN for the first and second scenarios.

شکل (۴) ساختارهای بهینه به دست آمده با استفاده از روش پیشنهادی را برای هر دو سناریو نشان می دهد. شبکه بهینه در سناریوی اول شامل هفت مبدل فرآیندی، سه مبدل یوتیلیتی گرم و دو مبدل یوتیلیتی سرد است. هزینه سالانه کل این شبکه برابر با ۳/۱۳۱ میلیون دلار به دست آمد. همچنین، مصرف یوتیلیتی گرم و سرد به ترتیب برابر با ۱۸۶۷۴/۱۷ و ۴۷۲۴/۱۷ کیلووات و حداقل اختلاف دمای بین جریان های گرم و سرد برابر با ۴/۷۲ °C بود. در سناریوی دوم، شبکه بهینه شامل هشت مبدل فرآیندی، دو مبدل یوتیلیتی گرم و دو مبدل یوتیلیتی سرد است. هزینه سالانه کل این شبکه برابر با ۳/۴۷۸ میلیون دلار به دست آمد. مصرف یوتیلیتی گرم و سرد در سناریوی دوم به ترتیب ۱۹۴۵۱/۵۶ و ۵۵۰۱/۵۶ کیلووات و حداقل اختلاف دمای بین جریان های گرم و سرد برابر با ۵/۸۹ °C به دست آمد.



(a) 1st Scenario

$$\Delta T_{\min} = 4.718 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ TAC} = 3,131,476.76 \text{ } \$ \cdot \text{y}^{-1}$$



(b) 2nd Scenario

$$\Delta T_{\min} = 5.894 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ TAC} = 3,477,899.13 \text{ } \$ \cdot \text{y}^{-1}$$

شکل ۴. شبکه بهینه به دست آمده با روش پیشنهادی برای سناریوهای اول و دوم.

Figure 4. The optimal network obtained by the proposed method for the first and second scenarios.

با مقایسه دو ساختار بهینه نشان داده شده در شکل (۴)، مشاهده می شود که با وجود یکسان بودن اطلاعات شبکه و پارامترهای الگوریتم ژنتیک در هر دو سناریو و تفاوت تنها در جنس مبدل های مورد استفاده برای جریان های خورنده (SS برای سناریو اول و TI برای سناریو دوم)، ساختار شبکه بهینه در دو سناریو متفاوت به دست آمد. این تفاوت ناشی از ملاحظات اقتصادی و تغییر هزینه های سرمایه گذاری مبدل ها در اثر تغییر جنس آن ها است؛ به گونه ای که الگوریتم ژنتیک با هدف دستیابی به حداقل TAC، ساختار متفاوتی را برای هر سناریو به دست آورده است.

در جدول (۲)، مشخصات مبدل های شبکه بهینه برای هر دو سناریو ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، در شبکه بهینه سناریوی اول، مبدل فرآیندی E₃ از جنس استیل ضدزنگ است، در حالی که مبدل های فرآیندی مبدل فرآیندی E₁، E₂، E₄ و E₆ و مبدل یوتیلیتی گرم HU₄ به صورت ترکیبی از کربن استیل/استیل ضدزنگ در نظر گرفته شده اند. سایر مبدل های فرآیندی و یوتیلیتی نیز از جنس کربن استیل هستند. در شبکه بهینه سناریوی دوم، مبدل های فرآیندی E₁، E₂ و E₃ از جنس تیتانیوم بوده و مبدل فرآیندی E₇ به صورت ترکیبی از کربن استیل/تیتانیوم در نظر گرفته شده است. سایر مبدل های فرآیندی و یوتیلیتی نیز از جنس کربن استیل هستند.

جدول ۲. مشخصات مربوط به مبدل های شبکه مبدلی بهینه به دست آمده برای هر دو سناریوی مورد مطالعاتی.

Table 2. Specifications of the heat exchangers in the optimal HEN for the both scenario of case study.

Exchanger	1 st Scenario (Figure 4.a)			2 nd Scenario (Figure 4.b)		
	Heat load (kW)	Area (m ²)	shell/tube	Heat load (kW)	Area (m ²)	shell/tube
E ₁	1247.64	224.27	CS/SS	2500.00	420.43	TI/TI
E ₂	7250.00	2877.04	CS/SS	1500.00	232.66	TI/TI
E ₃	1252.36	271.25	SS/SS	1750.00	578.78	TI/TI
E ₄	2497.64	958.52	CS/SS	2771.51	2045.05	CS/CS
E ₅	4753.11	2510.04	CS/CS	5028.49	3323.03	CS/CS
E ₆	3046.89	737.35	CS/SS	2162.11	1335.31	CS/CS
E ₇	4528.19	3201.99	CS/CS	2000.00	470.70	CS/TI
E ₈	-	-	-	4086.33	2210.70	CS/CS
CU ₁	252.36	33.66	CS/CS	587.89	73.92	CS/CS
CU ₂	4471.81	957.94	CS/CS	4913.67	1036.47	CS/CS
HU ₂	9002.36	793.75	CS/CS	10471.51	878.07	CS/CS
HU ₃	8718.70	1101.69	CS/CS	8980.05	1121.07	CS/CS
HU ₄	953.11	40.59	CS/SS	-	-	-

*Abbreviations: CS: Carbon Steel, TI: Titanium;

مقایسه نتایج حاصل از مورد مطالعاتی با نتایج گزارش شده در مراجع برای هر دو سناریو، در جدول (۳) ارائه شده است. پنجه شاهی و همکاران [۱۰] مسئله را با استفاده از روش تجزیه کلی مبتنی بر تکنولوژی پینچ حل کرده بودند. در این روش، برای جریان های معمولی و خورنده، شبکه های مبدلی مجزایی در نظر گرفته شده و به منظور کاهش بار حرارتی یوتیلیتی ها و هزینه سالانه کل، حداقل یک اتصال بین یک جریان گرم از شبکه حاوی جریان های خورنده و یک جریان سرد از شبکه شامل جریان های معمولی، که بیش ترین ظرفیت گرمایی جریانی را داشت، برقرار شده بود. کریمی و همکاران [۱۵] نیز از رویکرد مشابهی برای حل این مسئله بهره

گرفته بودند. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۳)، شبکه مبدل‌های حرارتی پیشنهادی در این تحقیق توانسته است هزینه سالانه کل شبکه را به ترتیب حدود ۰/۶۹ درصد و ۰/۸۹ درصد به ترتیب برای سناریو اول و دوم نسبت به نتایج گزارش شده در مراجع کاهش دهد.

جدول ۳. مقایسه نتایج با مراجع برای مورد مطالعاتی.

Table 3. Comparison of the obtained results for the case study.

Senario		Units	ΔT_{min} (°C)	Q_{HU} (kW)	Q_{CU} (kW)	Total Area (m ²)	TAC (\$. y ⁻¹)
1 st	Panjeh Shahi et al. [10]	11	8	19,500.00	5,550.00	13,315.00	3,153,317
	This work	12	5.89	18,674.18	4,724.18	13,708.10	3,131,477
2 nd	Panjeh Shahi et al. [10]	11	5	21,200.00	7,250.00	11,768.00	3,589,679
	Karimi et al. [15]	13	8	19,500.00	5,550.00	13,734.00	3,509,007
	This work	12	5.89	19,451.56	5,501.56	13,726.17	3,477,899

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به جای حل هم‌زمان متغیرهای ساختاری و پیوسته در طراحی شبکه‌های مبدل حرارتی غیریکنواخت، یک روش ترکیبی دوسطحی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و روش‌های بهینه‌سازی ریاضی ارائه شد. در سطح بیرونی، الگوریتم ژنتیک ساختارهای متنوع شبکه مبدلی را تولید می‌کرد و در سطح درونی، متغیرهای پیوسته هر ساختار در دو گام تعیین می‌شدند. گام نخست شامل یک مدل برنامه‌ریزی خطی همراه با یک حلقه جست‌وجو برای تعیین نسبت‌های تقسیم جریان و گام دوم شامل یک فرآیند اصلاح خطی برای تعیین بار حرارتی مبدل‌ها، نسبت‌های تقسیم جریان، حداقل اختلاف دمای شبکه و هزینه سالانه کل بود. از دیگر ویژگی‌های روش پیشنهادی، محاسبه ضمنی مساحت مبدل‌ها بود که امکان استفاده از توابع هزینه متفاوت برای مبدل‌ها و در نتیجه، در نظر گرفتن مبدل‌هایی از جنس‌های مختلف را فراهم می‌کرد. این قابلیت با لحاظ کردن بردار آدرس‌دهی مبدل‌ها و ماهیت جریان‌ها از منظر خوردگی امکان‌پذیر بود. بدین ترتیب، فرآیند حل مسائل طراحی شبکه مبدل‌ها، به‌ویژه در حضور مبدل‌های غیریکنواخت، نسبت به حل هم‌زمان متغیرهای ساختاری و پیوسته در قالب یک مدل نامحدب و غیرخطی، ساده‌تر شد و امکان دستیابی به شبکه‌هایی با هزینه سالانه پایین را فراهم کرد. نتایج مطالعه موردی شامل دو سناریو نشان داد که روش پیشنهادی، علی‌رغم سادگی، توانست هزینه سالانه کل شبکه را در مقایسه با مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین، به ترتیب حدود ۰/۶۹ و ۰/۸۹ درصد در سناریوهای اول و دوم کاهش دهد. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت روش پیشنهادی در طراحی و بهینه‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی با مبدل‌هایی از جنس‌های مختلف است.

۷- مراجع

- [1] 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. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.02.038>
- [2] Toimil, D., & Gómez, A. (2017). Review of metaheuristics applied to heat exchanger network design. *International Transactions in Operational Research*, 24(1–2), 7–26. <https://doi.org/10.1111/itor.12296>

- [3] 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. <https://doi.org/10.22034/ijche.2023.395715.1308>
- [4] Soltani, H. (2026). Theoretical and practical methods for retrofitting industrial heat exchanger networks using genetic algorithm coupled with mathematical optimization methods. *Chemical Engineering Science*, 323, 123236. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.123236>
- [5] Jegede, F. O., & Polley, G. T. (1992). Capital cost targets for networks with non-uniform heat exchanger specifications. *Computers & Chemical Engineering*, 16, 477–495. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(92\)85012-W](https://doi.org/10.1016/0098-1354(92)85012-W)
- [6] Hall, S. G., Ahmad, S., & Smith, R. (1990). Capital cost targets for heat exchanger networks comprising mixed materials of construction, pressure ratings and exchanger types. *Computers & Chemical Engineering*, 14, 319–335. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)87069-2](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)87069-2)
- [7] Ahmad, S., Linnhoff, B., & Smith, R. (1990). Cost optimum heat exchanger networks—2. Targets and design for detailed capital cost models. *Computers & Chemical Engineering*, 14, 751–767. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)87084-3](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)87084-3)
- [8] Hojati, G., Omidkhah, M. R., & Panjeh Shahi, M. H. (2004). Cost effective heat exchanger network design with mixed materials of construction. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 23, 89–100. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2004.8143>
- [9] Yee, T. F., & Grossmann, I. E. (1990). Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 14, 1165–1184. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)85010-8](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)85010-8)
- [10] Panjeh Shahi, M. H., Amidpour, M., & Ahmadi Danesh, H. (2005). Generalization of decomposed integration methods for cost effective heat exchanger networks with multiple cost laws. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 24, 7–19. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2005.8127>
- [11] Serna-González, M., Jiménez-Gutiérrez, A., & Ponce-Ortega, J. M. (2007). Targets for heat exchanger network synthesis with different heat transfer coefficients and non-uniform exchanger specifications. *Chemical Engineering Research and Design*, 85, 1447–1457. [https://doi.org/10.1016/S0263-8762\(07\)73184-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8762(07)73184-2)
- [12] Fieg, G., Hou, X. R., Luo, X., & Ma, H. G. (2009). The optimal design of heat exchanger networks considering heat exchanger types. *Computer Aided Chemical Engineering*, 26, 659–664. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70110-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70110-5)
- [13] Sun, K. N., Wan Alwi, S. R., & Manan, Z. A. (2013). Heat exchanger network cost optimization considering multiple utilities and different types of heat exchangers. *Computers & Chemical Engineering*, 49, 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.10.017>
- [14] Karimi, H., Danesh Ashtiani, H. A., & Aghanajafi, C. (2019). Study of mixed materials heat exchanger using optimization techniques. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 17, 414–433. <https://doi.org/10.1108/JEDT-09-2018-0142>
- [15] Karimi, H., Danesh Ashtiani, H. A., & Aghanajafi, C. (2019). Applying multiple decomposition methods and optimization techniques for achieving optimal cost in mixed materials heat exchanger networks. *International Journal of Energy Research*, 43, 3711–3722. <https://doi.org/10.1002/er.4526>
- [16] Karimi, H., Danesh Ashtiani, H. A., & Aghanajafi, C. (2020). Optimization of the total annual cost in mixed materials heat exchanger network by detailed equipment design using particle swarm technique. *International Journal of Thermodynamics*, 23, 216–222. <https://doi.org/10.5541/ijot.710239>
- [17] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117140>