

طراحی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی با ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حجت‌الله رحیمی زاده: کارشناس ارشد مهندسی شیمی گرایش فرایند

حسین شریف پور: کارشناس ارشد مهندسی شیمی گرایش مهندسی پلیمر

نیروگاه سیکل ترکیبی بهبهان - خوزستان، کیلومتر ۲۲ جاده بهبهان به رامهرمز، جنب روستای آب امیری

hojat_rahimizadeh@yahoo.com

چکیده

طراحی و یا اصلاح شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی توسط روش‌های بهینه‌سازی منجر به مسائلی از نوع MINLP می‌شود که حل آنها به دلیل حضور همزمان متغیرهای پیوسته و ناپیوسته امری دشوار است و منجر به ظهور مشکلاتی در هم‌گرایی می‌شود. زمانی که مسأله افت فشار در طراحی و یا اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی در نظر گرفته شود، به دلیل ذات غیرخطی و نامحدب روابط حاکم بر این مسائل، مشکلات هم‌گرایی چنین مدل‌هایی بیشتر خواهد شد. روشی برای طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی ارائه شده است که در آن پارامترهای ساختاری توسط الگوریتم ژنتیک^۱ و پارامترهای پیوسته به کمک فرمولاسیون غیرخطی^۲ بهینه می‌گردند. در ادامه به علت پرهیز از پیچیدگی مدل به دلیل روابط خاص افت فشار، افت فشار جریان‌ها با استفاده از نتایج فرمولاسیون غیرخطی، به دست می‌آیند. در این روش هر شبکه به عنوان توالی ژن‌ها در نظر گرفته شده است که هر ژن حاوی تعدادی گره است و هر گره نشان‌دهنده آدرس یک مبدل است. با توجه به اینکه بیشتر کارهایی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته است، بر پایه‌ی ثابت گرفتن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ثابت بوده است، لذا در این تحقیق ابتدا ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی در سمت پوسته و لوله را از طریق الگوریتم کرن در طراحی مبدل‌ها بدست می‌آوریم و سپس از طریق الگوریتم ژنتیک به طراحی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی می‌پردازیم. برای حل NLP به جای بهینه‌سازی هم‌زمان متغیرها، از یک مدل جستجو برای حداقل اختلاف دمایی نزدیکی در مبدل‌ها و نسبت تقسیم جریان‌ها و همچنین از یک تابع هدف اصلاح‌شده برای حداکثر بازیابی انرژی استفاده شده است. مقایسه نتایج حاصل با مراجع نشان می‌دهد که روش مذکور قادر به ایجاد جواب‌های دقیق‌تری در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با هزینه سالیانه کمتر است.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی، بهینه‌سازی، افت فشار، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی،

الگوریتم ژنتیک

^۱ GA

^۲ NLP



مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر، به دلیل کاهش منابع انرژی و رشد روزافزون هزینه‌ی انرژی، صرفه‌جویی در مصرف انرژی جزء برنامه‌های اصلی واحدهای صنعتی به شمار می‌رود. چرا که مصرف بالای انرژی علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین، باعث افزایش آلاینده‌های محیطی می‌گردد که این امر با مخالفت شدید سازمان‌های حامی محیط زیست مواجه گردیده است. در پی تلاش‌های صاحب‌نظران برای رفع این معضل، روش‌های متعددی پیشنهاد گردید که از جمله این روش‌ها، استفاده بهینه از انرژی تلف شده در این فرایندها می‌باشد. انتگراسیون یا یکپارچه‌سازی فرایند مفهوم نسبتاً جدیدی است که از دهه‌ی ۸۰ میلادی آغاز و در دهه‌ی ۹۰ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت [۱].

انتگراسیون فرایند در موارد زیر کاربرد دارد:

- صرفه‌جویی در مصرف انرژی
- کم کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای
- بهینه‌سازی فرایندهای ناپیوسته
- بهینه‌سازی مصرف هیدروژن
- طراحی راکتور و بهبود شرایط عملیات
- حداقل نمودن میزان مصرف آب و میزان تولید پساب
- بهینه‌سازی فرایندهای متوالی جداسازی
- کم کردن پسماند
- بهینه‌سازی سیستم تاسیسات جانبی

کاهش هزینه سرمایه‌گذاری

در سال ۱۹۹۸، لوین و همکارانش یکی از مهم‌ترین کارها در زمینه‌ی طراحی HEN (Heat Exchanger Network) را انجام داده‌اند. لوین کار خود را در این سال در دو بخش انجام داد. در بخش اول تابع هدف بیشترین بازایی انرژی از HEN قرار داده شده است که در این کار آن‌ها برای تعیین ساختار شبکه از الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm) استفاده کردند [۲]. لوین در همان سال در چهارچوب طراحی شده برای مسأله‌ی خود دو تغییر را اعمال نمود. اول اینکه تابع هدف مسأله را هزینه‌ی نهایی HEN قرار داد و دوم اینکه امکان تقسیم شدن جریان را نیز در ساختار خود مد نظر قرار داد [۳].

در سال ۲۰۰۵، رواقنانی (Ravaghani) و همکارانش با استفاده از آنالیز پینچ به همراه G.A. به بهینه‌سازی HEN هایی که در آنها تقسیم جریان نیز وجود داشت اقدام کردند. آن‌ها ΔT_{min} را با استفاده از G.A. در تلفیق با مفاهیم آنالیز پینچ بهینه‌سازی نمودند. در دیدگاه آنها بهینه‌سازی ΔT_{min} ضروری بوده و اظهار داشتند که عدم انتخاب درست ΔT_{min} هم از لحاظ هزینه‌ی دستگاهی به کار رفته و هم از لحاظ انرژی مصرف شده به ضرر شبکه‌ی نهایی تمام می‌شود [۴].

در سال ۲۰۰۸، یرامستی (Yerramsetty) و مورتی از روش تکامل دیفرانسیلی (Differential Evolution) یا DE برای بهینه‌سازی هزینه‌ی سالیانه‌ی HEN استفاده کردند. ایده‌ی این الگوریتم در سال ۱۹۹۷ توسط پرایس و استرن ارائه شده است. این الگوریتم، الگوریتمی سریع در بهینه‌سازی عددی محسوب شده و با احتمال بالایی می‌تواند نقطه‌ی بهینه را پیدا کند. البته



DE برای بهینه‌سازی مسائل با متغیرهای پیوسته خوب عمل می‌کند و از آنجایی که در مسائل طراحی HEN متغیرهای گسسته نیز وجود دارند، تلاش بر آن شده است تا با اصلاحاتی از DE برای بهینه‌سازی هر دو نوع متغیر بهره گرفته شود [۵].

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط (1975) جان هالند (John Holland) به صورت علمی به عنوان روشی برای بهینه‌سازی معرفی گردید و سرانجام یکی از دانشجویان وی به نام (1989) داوید گلبرگ (David Goldberg) این روش را در تکمیل پایان‌نامه‌ی خود و در حل کنترل خط لوله انتقال گاز بکار برد [۶]. می‌توان به موارد زیر به عنوان وجه تمایز این روش و سایر روش‌های بهینه‌سازی اشاره کرد:

- ۱- توانایی بهینه‌سازی متغیرهای پیوسته یا ناپیوسته.
- ۲- عدم احتیاج به اطلاعات مشتقات توابع.
- ۳- جستجوی هم‌زمان توسط نمونه‌گیری از نقاط مختلف فضای جواب.
- ۴- امکان بهینه‌سازی مسائلی با تعداد متغیرهای زیاد.
- ۵- مناسب بودن برای به‌کارگیری در کامپیوترهای موازی.
- ۶- امکان بهینه‌سازی در فضاهایی که از قله و دره‌های تندی تشکیل شده‌اند و توانایی خروج از بهینه‌های محلی.
- ۷- ایجاد چندین جواب مناسب به‌جای یک جواب.
- ۸- تبدیل پارامترهای بهینه‌سازی به کدهای ویژه و انجام بهینه‌سازی توسط کدهای حاصل [۶].

در ادامه به معرفی اجزاء این الگوریتم پرداخته خواهد شد.

۱- تعریف تابع هدف و پارامترهای بهینه‌سازی: تابع هدف در الگوریتم ژنتیک وظیفه تولید خروجی از پارامترهای ورودی (کروموزوم‌ها) را دارد که می‌تواند به صورت یک تابع ریاضی و یا نتایج حاصل از یک آزمایش تعریف گردد. بنابراین هدف بهینه‌سازی رسیدن به پارامترهای ورودی بهینه‌ای است که بهترین میزان تابع هدف را ایجاد کند.

اگر تعداد متغیرهای بهینه‌سازی برابر N باشد، هر کروموزوم نیز باید به گونه‌ای تعریف گردد که این متغیرها را در بر گیرد. بنابراین اگر متغیرها با P_1, P_2, \dots, P_N نشان داده شوند، هر کروموزوم به عنوان آرایه‌ای از N پارامتر موجود تعریف می‌شود:

$$\text{chromosome} = [P_1, P_2, \dots, P_N] \quad (1)$$

که ارزش هر کروموزوم با توجه به تابع هدف مشخص می‌گردد:

$$\text{Value of each chro} = \text{Obj. fun. (Chro)} = f(P_1, \dots, P_N) \quad (2)$$

همان‌طور که می‌دانیم اجزاء تشکیل دهنده کروموزوم‌ها ژن‌ها می‌باشند که با توجه به معادله (۱) هر متغیر ناپیوسته بیانگر یک ژن خواهد بود. بنابراین اگر مسأله‌ای دارای N متغیر بهینه‌سازی باشد، هر کروموزوم به‌کار گرفته شده در الگوریتم ژنتیک حاوی N ژن است

- ۲- جمعیت اولیه: الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه که از تعداد معین و ثابتی از کروموزوم‌ها تشکیل شده و نماینده نمونه‌هایی از کل فضای جواب هستند، آغاز به کار می‌کند. جواب بهینه در بازه‌ی جمعیت اولیه ۳۰ تا ۵۰ به دست می‌آید و این بستگی به اندازه‌ی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی دارد.
- ۳- انتخاب طبیعی: بعد از مرحله‌ی ارزیابی و با توجه به این‌که هدف بهینه‌سازی پیدا کردن بیشینه یا کمینه باشد، کروموزوم‌ها بر اساس بهترین جواب‌ها مرتب می‌شوند. سپس با توجه به درصد از پیش تعیین شده‌ای (معمولاً پنجاه درصد)، تعدادی از آنها که جواب‌های بهتری دارند مستقیماً برای تولیدمثل و بقاء در نسل آینده انتخاب شده و باقی کروموزوم‌ها از چرخه حیات حذف می‌گردند.
- ۴- انتخاب والدین: برای حفظ تعداد اعضای جمعیت اولیه و جایگزینی اعضای جدید به جای آن‌هایی که حذف شده‌اند، باید تولیدمثل انجام گرفته و فرزندان به عنوان اعضای جدید معرفی گردند. همان‌طور که ذکر شد والدین از میان کروموزوم‌هایی انتخاب می‌شوند که مستقیماً وارد نسل بعدی شده‌اند.
- ۵- تولیدمثل (تقاطع): روش متداول برای ایجاد فرزندان بدین صورت است که در دو نقطه‌ی تصادفی از کروموزوم‌های والدین جدایشی انجام شده و قطعات بریده شده به صورت مورب به یکدیگر پیوند می‌خورند تا دو عضو جدید به وجود آیند. این عملیات به تقاطع تک نقطه‌ای (Single point Crossover) معروف است و در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن هر فرزند قسمتی از کروموزوم‌های والدین خود را به ارث می‌برد.

$$\text{Parent}_1 : \overline{\overline{00100110011101}}$$

$$\text{Parent}_2 : \overline{\overline{01010110000100}}$$

$$\text{Offspring}_1 : \overline{\overline{00100110011100}}$$

$$\text{Offspring}_2 : \overline{\overline{01010110000101}}$$

شکل ۱- تقاطع تک نقطه‌ای [۷]

۶- جهش ژنتیکی: به منظور جستجوی تمامی فضای جواب و عدم هم‌گرایی زودرس و حفظ پراکندگی مناسب در الگوریتم ژنتیک، از جهش ژنتیکی استفاده می‌گردد. این عملگر با انتخاب تصادفی تعدادی از کل بیت‌های موجود در ماتریسی به ابعاد $N_c \times N_b$ و تغییر مقادیر آنها از صفر به یک و از یک به صفر عمل می‌کند. اصولاً درصد کل بیت‌هایی که دست‌خوش تغییر می‌شوند بین یک تا پنج درصد در نظر گرفته شده که این مقدار وابسته به نوع مسأله، تعداد اعضای جمعیت اولیه و مکانیسم به کار گرفته شده در الگوریتم ژنتیک می‌باشد. درصد جهش بالا سبب می‌شود که در هر نسل تعداد ژن‌های جدیدی به الگوریتم وارد شده و خاصیت تکاملی الگوریتم ژنتیک از بین برود. از طرفی درصدهای کم جهش نیز سبب عدم جستجوی تمامی فضای جواب شده و باعث هم‌گرایی زودرس می‌گردد.

۷- معیارهای خاتمه‌ی الگوریتم ژنتیک: در فرآیند تکراری الگوریتم ژنتیک معمولاً در صورت تحقق یکی از شروط زیر می‌توان الگوریتم را متوقف کرد که عبارت‌اند از: تعداد نسل‌های تولید شده، محدودیت در زمان بهینه‌سازی، محدودیت لیاقت، شرط ایستایی [۸].

بیان ساختار شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی

از آنجایی که در این پایان‌نامه هدف از به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای ساختاری شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی و رسیدن به بهترین آرایش مبدل‌هاست، اولین قدم در این روش تبدیل آرایش شبکه‌ها به کدهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک است (کدگذاری). برای این منظور آرایش هر شبکه از مبدل‌های حرارتی به عنوان یک کروموزوم و مبدل‌های موجود در آن به عنوان توالی‌ای از ژن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین هر ژن حاوی آدرسی از یک یا چند مبدل خواهد بود. برای آدرس‌دهی مکان مبدل‌ها از گره‌هایی در هر ژن مانند شکل (۲) استفاده شده است که در آن تعداد شاخه‌های به‌کار رفته در تقسیم‌کننده‌های موجود در هر ژن می‌تواند به طور دلخواه تعیین گردد. استفاده از گره‌ها برای بیان مبدل‌ها امری متداول بوده چنانچه در [۹] و [۱۰] نیز از این تکنیک استفاده شده است.

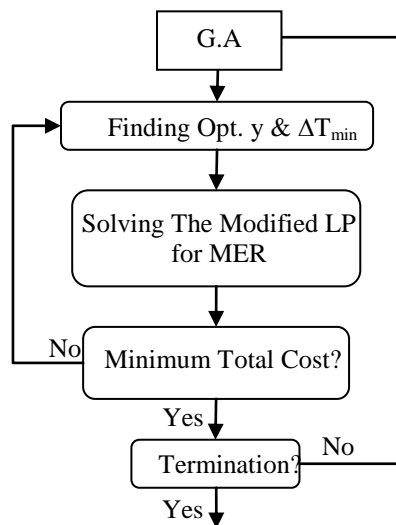
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 3 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

شکل ۲- نمونه‌ای از ماتریس ساختار

در این ماتریس ستون اول تا ششم به ترتیب بیانگر شماره‌ی جریان‌های گرم، شماره‌ی ژن جریان گرم، فرعی و یا اصلی بودن جریان گرم (عدد ۲ اصلی و عدد ۳ فرعی)، شماره جریان سرد، شماره‌ی ژن جریان سرد، فرعی و یا اصلی بودن جریان سرد (عدد ۲ اصلی و عدد ۳ فرعی) می‌باشند. همچنین هر سطر از این ماتریس نشان‌دهنده‌ی یک مبدل در شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی می‌باشد. برای مثال می‌توان گفت دومین مبدل حرارتی در این ساختار مبدلی است که در ژن اول این ساختار جریان گرم شماره یک و جریان سرد شماره دو وارد این مبدل می‌شوند و هر دو بر روی مسیر اصلی این دو جریان قرار دارند. در هر ژن حداکثر دو مبدل می‌تواند قرار بگیرد. تعداد ژن‌های انتخابی بستگی به اندازه‌ی ساختار شبکه دارد. بیشترین تعداد مبدل‌های حرارتی که امکان وجود آنها در شبکه قابل تصور است را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۳) محاسبه کرد:

$$\text{تعداد سطرها} = (1 + \text{تعداد ژن‌ها}) \times 2 \quad (3)$$

طراحی شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی با در نظر گرفتن افت فشار توسط تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش حل غیرخطی

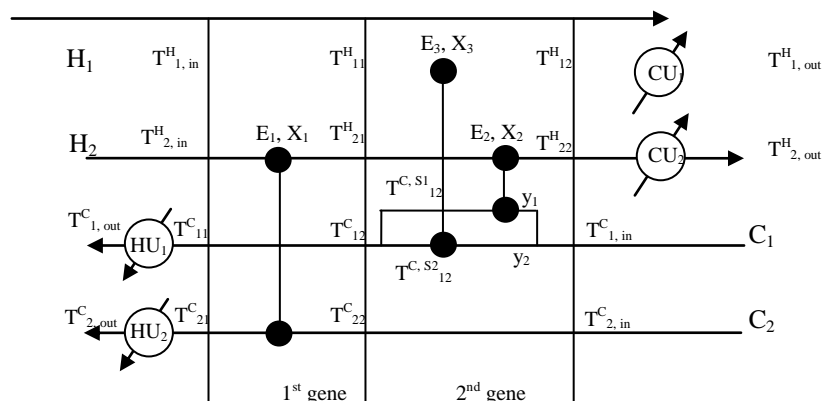


شکل ۳- طراحی شبکه‌های مبدل‌های حرارتی توسط تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش حل غیرخطی

روش کار: در ابتدا الگوریتم ژنتیک کار خود را با یک جمعیت اولیه که از چندین شبکه تشکیل شده است شروع می‌کند و با توجه به عملگرهای خود که شامل تولید مجدد، تقاطع و جهش هستند به بهینه‌سازی ساختار شبکه‌ها می‌پردازد. سپس شبکه‌های موجود در هر نسل برای تعیین میزان لیاقت خود به قسمت بهینه‌سازی غیرخطی فرستاده می‌شوند. در این قسمت نسبت‌های تقسیم جریان‌ها و حداقل اختلاف دمایی موجود در مبدل‌ها به طور هم‌زمان با سایر متغیرها بهینه نشده و در عوض از یک حلقه‌ی جستجو برای یافتن مقادیر بهینه‌ی آنها استفاده شده است. بنابراین فرمولاسیون غیرخطی به حل چندین LP برای رسیدن به حداکثر بازیابی انرژی و یک حلقه‌ی جستجو تبدیل می‌شود چراکه با مشخص بودن مقادیر نسبت تقسیم جریان‌ها، مسأله حالتی خطی پیدا می‌کند. نتایج حاصل از حل مدل LP شامل دماهای ورودی و خروجی از مبدل‌ها و بار حرارتی مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی است. با استفاده از نتایج به دست آمده، مساحت مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی محاسبه شده و هزینه‌ی کلی آنها که از هزینه‌ی سطح و مصرف انرژی خارجی تشکیل شده است، کمینه می‌گردد. در واقع تابع هدف کمینه کردن هزینه کل می‌باشد.

فرمول‌ها و روابط

برای نشان دادن و نحوه‌ی فرمول‌نویسی شبکه‌ی مبدل‌ها، از یک شبکه‌ی مبدل‌ها شامل سه مبدل و دو ژن و همچنین دو جریان گرم و دو جریان سرد به عنوان نمونه استفاده شده است.





شکل ۴- شبکه‌ای با سه مبدل حرارتی

الف) موازنه‌ی انرژی مبدل‌های فرآیندی:

$$\begin{aligned} E_1: T_{2, in}^H - X_1/F_2^H &= T_{21}^H, & T_{22}^C + X_1/F_2^C &= T_{21}^C \\ E_2: T_{21}^H - X_2/F_2^H &= T_{22}^H, & T_{1, in}^C + X_2/(y_1 F_1^C) &= T_{12}^{C, S1} \\ E_3: T_{11}^H - X_3/F_1^H &= T_{12}^H, & T_{1, in}^C + X_3/(y_2 F_1^C) &= T_{12}^{C, S2} \end{aligned}$$

ب) موازنه‌ی انرژی مبدل‌های یوتیلیتی:

$$\begin{aligned} H_1: T_{12}^H - CU_1/F_1^H &= T_{1, out}^H, & H_2: T_{22}^H - CU_2/F_2^H &= T_{2, out}^H \\ C_1: T_{11}^C + HU_1/F_1^C &= T_{1, out}^C, & C_2: T_{22}^C + HU_2/F_2^C &= T_{2, out}^C \end{aligned}$$

ج) موازنه‌ی جرم تقسیم‌کننده‌ها:

$$y_1 + y_2 = 1$$

د) افزایش یا کاهش متوالی دماهای هر یک از جریان‌ها:

$$H_1: T_{1, in}^H > T_{11}^H > T_{12}^H > T_{1, out}^H$$

برای سایر جریان‌ها نیز چنین روابطی حاکم است.

ه) رعایت حداقل اختلاف دمای نزدیکی مبدل‌ها:

$$E_1: T_{2, in}^H - T_{21}^C \geq \Delta T_{min}, \quad T_{21}^H - T_{22}^C \geq \Delta T_{min}$$

روابط مشابهی نیز برای سایر مبدل‌های فرآیندی و یوتیلیتی برقرار است.

و) موازنه‌ی انرژی نقاط اختلاط:

$$T_{12}^C = y_1 T_{12}^{C, S1} + y_2 T_{12}^{C, S2}$$

در عبارات بالا T_{ij} بیانگر دمای آمین جریانی است که از آمین ژن خارج می‌گردد و از y_i برای نشان دادن آمین

نسبت تقسیم در یک جداکننده استفاده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود این فرمولاسیون به دلیل وجود عبارات غیرخطی

در اولین قید ذاتاً غیرخطی است که برای حل آن از الگوریتم زیر استفاده می‌گردد [۲] و [۳].

روابط افت فشار

مبدل‌های مورد استفاده در شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی از نوع یک گذر پوسته - یک گذر لوله می‌باشند که افت فشار

در سمت پوسته و لوله از روابط زیر بدست می‌آیند:

افت فشار جریان‌های گرم:

$$\Delta P_i = K_{si} A_{Ti} h_i^{5.1}, \quad \forall i \in HP \quad (۴)$$

افت فشار جریان‌های سرد:

$$\Delta P_j = K_{ij} A_{Tj} h_j^{3.5}, \quad \forall j \in CP \quad (۵)$$

$$K_{t,j} = \left(\frac{67.062 \times \phi_j^{6.109}}{g_c} \right) \left(\frac{L_{tp} - D_t}{D_t} \right) \left(\frac{L_{tp} D_e^{1.109} \mu_j^{1.297}}{F_j \rho_j k_j^{3.406} Cp_j^{1.703}} \right) \quad (۶)$$

$$K_{s,i} = \frac{\phi_i^{4.5} D^{1/2} \mu_i^{11/6}}{(0.023)^{2.5} g_c F_i \rho_i k_i^{7/3} Cp_i^{7/6}} \quad (۷)$$

که در آنها ϕ ضریب تصحیح دمایی μ ویسکوزیته، ρ دانسیته، g_c ثابت گرانش، k ضریب انتقال حرارت هدایتی، ظرفیت حرارتی، L_{tp} گام لوله (Pitch)، D قطر داخلی لوله، D_t قطر خارجی لوله و D_e قطر معادل می‌باشند. برای به دست آوردن قطر معادل نیز می‌توان از روابط زیر کمک گرفت: برای گام مثلثی یا سه‌گوش:

$$D_e = \frac{4 \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} L_{tp}^2 - \frac{\pi}{8} D_t^2 \right]}{(\pi / 2 \times D_t)} \quad (۸)$$

و برای گام مربعی یا چهارگوش:

$$D_e = \frac{4 \times \left[L_{tp}^2 - \frac{\pi}{4} D_t^2 \right]}{(\pi \times D_t)} \quad (۸)$$

همچنین فرض شده است که جریان گرم در پوسته و جریان سرد در لوله قرار دارند.

مورد مطالعاتی

این مورد از دو جریان سرد و دو جریان گرم تشکیل شده است. داده‌های ترمودینامیکی و فیزیکی جریان‌ها به ترتیب در جدول (۳-۳) و (۴-۳) نشان داده شده است. با توجه به این‌که هیچ داده اقتصادی برای محاسبه هزینه شبکه حاصل در مرجع [۱۱] ذکر نشده، لذا داده‌های اقتصادی که در جدول (۲) نشان داده شده از مرجع [۱۲] گرفته شده است. بنابراین نتایج حاصل از [۱۱] با استفاده از داده‌های اقتصادی این جدول مورد محاسبه قرار گرفته است. قابل ذکر است که برای حل این مسأله سه ژن در هر کروموزوم قرار داده شده است.

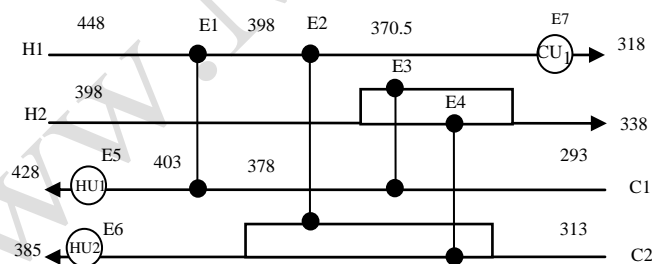
جدول ۱- داده‌های ترمودینامیکی مورد مطالعاتی

| Stream name | $T^{in} (^{\circ}K)$ | $T^{out} (^{\circ}K)$ | $FCp(kW/^{\circ}K)$ | $h(kW/m^2/^{\circ}K)$ |
|-------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| H1 | 448 | 318 | 10 | 2.615 |
| H2 | 398 | 338 | 40 | 1.333 |
| C1 | 293 | 428 | 20 | 0.917 |
| C2 | 313 | 385 | 15 | 0.166 |
| Steam | 453 | 452 | | 5 |
| Cooling | 288 | 298 | | 2.5 |

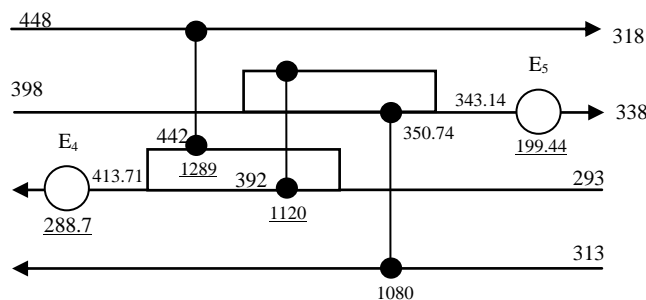
| Stream name | Density | Specific heat capacity | Viscosity | Heat conductivity |
|-------------|---------|------------------------|-----------|-------------------|
| H1 | 716 | 1658 | 0.24 | 0.11 |
| H2 | 777 | 2684 | 0.23 | 0.11 |
| C1 | 700 | 2456 | 0.23 | 0.12 |
| C2 | 680 | 2270 | 0.23 | 0.13 |

جدول ۲- داده‌های اقتصادی مورد مطالعاتی

| Items | Cost data | Remarks |
|----------------------------------|---|-----------------------------------|
| Heat exchanger capital cost (\$) | $30000 + 750 \times A^{0.81}$ | $A - m^2$ |
| Pump capital cost (\$) | $2000 + 5 \times (V \cdot \Delta P)^{0.68}$ | $V - m^3/s$ $\Delta P - N/m^2$ |
| Electricity cost (\$) | 0.05 per kW h | |
| Unit cost for hot utility (\$) | 120 per kW year | |
| Unit cost for cold utility (\$) | 10 per kW year | |
| Payback time (year) | 0.322 | |
| Interest rate | 0% | |
| Efficiency for P/C | 75% | |
| Operation time | 8000 h/year | |



شکل ۵- شبکه‌ی بهینه‌ی مثال اول مرجع [۱۱]





شکل ۶- شبکه‌ی بهینه‌ی به دست آمده مورد مطالعاتی

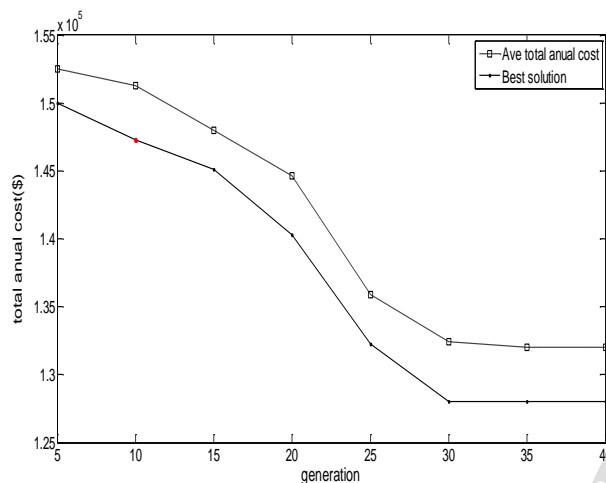
جدول (۳) و (۴) مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی با مثال اول مرجع [۱۱] را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه‌ی نتایج مورد مطالعاتی با مثال اول مرجع [۱۱]

| | ΔT_{\min} | Utility (\$/year) | Area cost (\$/year) | Cost of Power (\$/year) | Total cost (\$/year) |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| Ref-a | 20 | 71800 | 75553.75 | 2623.12 | 158237.51 |
| Ref-b | 20 | 71800 | 82810.1 | 2378.9 | 156989.7 |
| this work | 6.09 | 36590 | 91133 | 3887 | 131610 |

جدول ۴- مقایسه‌ی نتایج مورد مطالعاتی اول با مثال اول مرجع [۱۱]

| Stream name | Area (m ²) Ref -a | Area (m ²) Ref -b | Area (m ²) (this work) | (this work) | h (kw/m ² °c) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------|--------------------------|
| H1 | 82.26 | 57.16 | 166.93 | 46.2 | 2.797 |
| H2 | 313.67 | 409.19 | 394.76 | 23.55 | 1.870 |
| ST | 8.54 | 20.61 | 11.01 | - | - |
| C1 | 143.58 | 140.50 | 203.9 | 18.5 | 1.37 |
| C2 | 271.14 | 337.14 | 371.3 | 11.7 | 0.143 |
| CW | 27.33 | 9.32 | 7.81 | - | - |



شکل ۷- میانگین هزینه‌های هر جمعیت در مقابل تعداد نسل‌ها (مورد مطالعاتی اول)

نتیجه‌گیری و جمع بندی مطالب

همان‌طور که از نتایج مشهود است با آنکه افت فشار جریان‌ها در شبکه به دست آمده از این روش بالاتر از افت فشار به دست آمده در مرجع [۱۱] می‌باشد اما کارایی الگوریتم ژنتیک در تولید شبکه‌های مختلف و افزودن برخی ویژگی‌ها در تولید جمعیت اولیه، این نقیصه را برطرف کرده و با وجود افت فشار بالای جریان‌ها، هزینه سالیانه حدود ۱۶٪ کمتر از مقادیر اعلام شده در مثال اول مرجع [۱۱] می‌باشد. جواب بهینه‌ی مد نظر ما نیز در جمعیت ۳۰ بدست آمده است. همچنین ضریب‌های انتقال حرارت بدست آمده که در ستون ششم از جدول (۴) آورده شده است، نشان می‌دهد که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با آنچه در مرجع استفاده شده و در آنجا ثابت گرفته شده است را نشان می‌دهد و همچنین دقت جواب‌های بدست آمده در این کار را به دلیل متغیر گرفتن ضرایب انتقال حرارت بالا می‌برد. بررسی نتایج موارد بالا توانایی الگوریتم ژنتیک را در ساختارهای بهینه به ما اثبات می‌کند و می‌توان از آن به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای مورد استفاده در زمینه‌ی طراحی و اصلاح ساختار شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی یاد کرد.

مراجع

1. Linnhoff, B. and J.R. Flower, *Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks*. AIChE Journal, 1978. **24**(4): p. 633-642.
2. Lewin, D.R., H. Wang, and O. Shalev, *A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-I. general framework and MER optimal synthesis*. Computers & chemical engineering, 1998. **22**(10): p. 1503-1513.
3. Lewin, D.R., *A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-II. The synthesis of cost-optimal networks*. Computers & chemical engineering, 1998. **22**(10): p. 1387-1405.
4. Ravagnani, M., et al., *Heat exchanger network synthesis and optimisation using genetic algorithm*. Applied Thermal Engineering, 2005. **25**(7): p. 1003-1017.
5. Yerramsetty, K.M. and C. Murty, *Synthesis of cost-optimal heat exchanger networks using differential evolution*. Computers & Chemical Engineering, 2008. **32**(8): p. 1861-1876.
6. Haupt, R. and S. Haupt, *Practical genetic algorithms*. 2004. John Wiley & Sons.
7. Zalzal, A.M. and P.J. Fleming, *Genetic algorithms in engineering systems*. Vol. 55. 1997: Iet.
8. Gen, M. and R. Cheng, *Genetic algorithms and engineering optimization*. Vol. 7. 2000: John Wiley & Sons.
9. Zhu, X. and N. Asante, *Diagnosis and optimization approach for heat exchanger network retrofit*. AIChE journal, 1999. **45**(7): p. 1488-1503.

مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی مبدل گرمایی

دوم دی ماه ۱۳۹۵، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما

۰۹۱۹۷۵۵۶۴۲۴ - (۰۲۱) ۸۸۶۷۱۶۷۶

مجریان: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران و هم‌اندیشان انرژی‌های شیمیایی

ثبت شده در پایگاه استنادی جهان اسلام ISC

www.Mobadel.ir



10. Jeżowski, J., R. Bochenek, and G. Poplewski, *On application of stochastic optimization techniques to designing heat exchanger-and water networks*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2007. **46**(11): p. 1160-1174.
11. Frausto-Hernández, S., et al., *MINLP synthesis of heat exchanger networks considering pressure drop effects*. Computers & chemical engineering, 2003. **27**(8): p. 1143-1152.
12. Shenoy, U.V., *Heat exchanger network synthesis: process optimization by energy and resource analysis*. 1995: Gulf Professional Publishing.

www.Mobadel.ir