

طراحی بهینه‌ی یک مبادله‌کن فشرده‌ی گرما جهت بازیابی حرارت با الگوریتم زنبور عسل

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی
استادیار، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی
دانشیار، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی

فرشاد مرادی کشکولی*
عبدالله منصورى مهربان
افشین قنبرزاده
سیدسعید بحرینیان

چکیده

در این مقاله، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار به منظور بازیابی حرارت در سیستم‌های تولید همزمان برق و حرارت پرداخته شده است. متغیرهای طراحی جهت بهینه‌سازی مبادله‌کن گرما شامل طول جریان‌های گرم و سرد، تعداد لایه‌ها، گام، طول نیزه، ضخامت و ارتفاع پره می‌باشند. کارآیی مبادله‌کن و هزینه سالیانه کلی سیستم (مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه و عملکرد) به‌عنوان دو تابع هدف متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه با افزایش کارآیی (مطلوب)، سطح حرارتی و افت فشار (هزینه‌ی سالیانه کلی) افزایش می‌یابند (نامطلوب)، بنابراین به جای یک جواب خاص، به جواب‌هایی متعادل نیاز است که تمام توابع هدف را به‌صورت همزمان برآورده کند. در این مطالعه از الگوریتم چندهدفه‌ی زنبور عسل (MOBA) جهت بهبود هر دو تابع هدف استفاده شده است و مجموعه جواب‌ها به‌وسیله منحنی پاریتو نشان داده شده‌است. در نهایت، به منظور اثبات کارآیی الگوریتم پیشنهادی، نتایج به‌دست آمده با نمونه مورد مطالعه از مراجع، مقایسه شده که در تعدادی از نقاط طراحی، بهتر از نتایج مرجع می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: طراحی بهینه، مبادله‌کن فشرده‌ی گرما، بازیابی حرارت، الگوریتم زنبور عسل

Optimal Design of a Compact Heat Exchanger for Heat Recovery Using Bees Algorithm

F. Moradi-Kashkooli
A. Mansuri-Mehryan
A. Ghanbarzadeh
S. Bahrainian

M.Sc. Student, Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
M.Sc. Student, Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
Assistant Professor, Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz
Associate Professor, Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz

Abstract

In this paper, modeling and optimization of a plate-fin heat exchanger for heat recovery in simultaneous heat and power generation systems has been studied. Design variables for the optimization of heat exchanger are hot and cold flow lengths, number of layers, pitch, lance length, thickness and fin height. Effectiveness and total annual cost of system (sum of the initial investment cost and performance) are considered as two contradict objective functions. Due to the increase of efficiency (favorite), heat and pressure loss (total annual cost) increase (unfavorable), so instead of a specific answer, it is needed to balance solutions to satisfy all of the objective functions, simultaneously. In this study, the multi-objective Bees Algorithm (MOBA) is used to improve both objective functions and the results are shown as a Pareto curve. Finally, in order to prove the effectiveness of the proposed algorithm, the results are compared with a case study from literature review that is better than the references results in some design points.

Keywords: Optimal design, Compact heat exchanger, Heat recovery, Bees Algorithm

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین انواع مبادله‌کن‌های گرمای، مبادله‌کن‌های گرمای فشرده^۱ می‌باشد. مزیت این مبادله‌کن‌ها، سطح انتقال حرارت زیاد در واحد حجم است که منجر به کاهش فضا، وزن، بهبود راندمان تبدیل انرژی و بهبود فرآیند طراحی در مقایسه با مبادله‌کن‌های معمولی می‌شود [۱]. یکی از انواع مهم مبادله‌کن‌های گرمای فشرده، مبادله‌کن‌های گرمای صفحه‌ای پرده‌دار می‌باشد. این مبادله‌کن‌ها به دلیل حجم و وزن کم، کارایی حرارتی بالا و توانایی چندجریانه، به طور گسترده در کاربردهای گاز- گاز از قبیل کرایوژنیک^۲ (تبرید در دمای خیلی کم)، میکروتوربین‌ها و صنعت هوافضا به کار می‌روند [۲].

تعدادی از پرده‌های معمول به کار رفته در این مبادله‌کن‌ها، پرده‌های ساده، سوراخ‌دار، کنگره‌ای، موجی شکل و میله‌ای می‌باشند. پرده‌های کنگره‌ای به دلیل انقطاع لایه مرزی و در نتیجه عدم امکان رشد آن، موجب افزایش در ضریب انتقال حرارت می‌شوند. بنابراین این پرده‌ها، کارایی انتقال حرارت بالاتری نسبت به پرده‌های مسطح ساده دارند [۳]. طراحی مبادله‌کن‌های صفحه‌ای پرده‌دار یک کار پیچیده بر اساس فرآیند سعی و خطا می‌باشد که پارامترهای هندسی و عملکرد، با ارضای نیازهایی از قبیل دمای خروجی، وظیفه حرارتی و افت فشار انتخاب می‌شوند. بر طبق مراجع، یکی از اهداف معمولی در طراحی مبادله‌کن‌های حرارتی، وابسته به کمیته‌سازی هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و عملکرد می‌باشد [۴]. در حالت کلی یک جریان سرعت بالا به معنی داشتن یک ضریب انتقال حرارت بالاتر و بنابراین مساحت انتقال حرارت پایین‌تر و به صورت متقابل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کمتر می‌باشد. در عین حال، سرعت بالاتر در حالت کلی منجر به افت فشار بالاتر و در نتیجه مصرف توان بیشتر و از این رو منجر به هزینه‌ی پمپاژ بالاتری می‌گردد. بنابراین قبل از انجام هر طراحی بهینه، کمیته‌سازی هزینه باید به عنوان یک تابع هدف مهم مطرح شود [۵].

اخیراً، الگوریتم ژنتیک بر اساس جستجوی تصادفی به طور گسترده در طراحی و بهینه‌سازی مبادله‌کن‌های حرارتی فشرده مورد استفاده قرار می‌گیرد. میشرا و همکاران [۲]، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن مبادله‌کن گرمای جریان متقاطع صفحه‌ای پرده‌دار بر اساس قانون دوم ترمودینامیک، جهت کمیته کردن تعداد واحدهای تولید انرژی برای یک وظیفه‌ی حرارتی معین و تحت محدودیت‌های مکانی مشخص، استفاده کردند. صنایع و حاج عبداللهی [۳ و ۶] از الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به بیشینه کارایی و کمیته هزینه سالیانه کلی به عنوان دو تابع هدف در یک مبادله‌کن صفحه‌ای پرده‌دار با پرده‌های کنگره‌ای

استفاده کردند. احمدی و حاج عبداللهی [۷] الگوریتم ژنتیک را برای دستیابی به کمیته تولید انرژی و هزینه سالیانه کلی به عنوان دو تابع هدف در یک مبادله‌کن صفحه‌ای پرده‌دار با پرده‌های کنگره‌ای به کار بردند.

نجفی و همکاران [۸] نیز، بهینه‌سازی چند هدفه را با کاربرد الگوریتم ژنتیک در دستیابی به پارامترهای طراحی بهینه برای مبادله‌کن‌های حرارتی صفحه‌ای پرده‌دار به کار بردند. نرخ انتقال حرارت کلی و هزینه سالیانه کلی مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پرده‌دار به عنوان دو تابع هدف مخالف در نظر گرفته شدند.

همچنین تعدادی از محققین کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات را برای بهینه کردن مبادله‌کن‌های حرارتی مطرح نموده‌اند. راثو و همکاران [۹]، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات را برای بهینه کردن یک مبادله‌کن گرمای جریان متقاطع صفحه‌ای پرده‌دار با هدف کمیته کردن تعداد واحدهای تولید انرژی، حجم کلی و هزینه سالیانه کلی به کار بردند. پنگ و همکاران [۱۰]، الگوریتم اجتماع ذرات بهبود یافته را برای یافتن پارامترهای طراحی بهینه‌ی یک مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پرده‌دار با افت فشارهای مجاز ارائه کردند. در این مطالعه، نشان داده شد که تحت پارامترهای طراحی و متغیرهای بهینه‌سازی یکسان، الگوریتم ارائه شده از زمان محاسباتی کمتر و نتایج بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک برخوردار است. یوسفی و همکاران [۴]، از الگوریتم پیوندی ژنتیک و اجتماع ذرات جهت طراحی بهینه‌ی مبادله‌کن‌های صفحه‌ای پرده‌دار استفاده کردند. در این مطالعه آنها به ترتیب کمیته‌ی مساحت سطح انتقال حرارت کلی مبادله‌کن (جهت کمیته کردن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری) و کمیته‌ی افت فشار کل مبادله‌کن (جهت کمیته کردن هزینه پمپاژ) را به عنوان توابع هدف در نظر گرفتند. در این مطالعه همچنین دقت بالاتر این الگوریتم در همگرایی به حل بهینه، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات نیز اثبات شد. در مطالعه‌ی دیگر، یوسفی و همکاران [۱۱] از الگوریتم رقابت استعماری جهت دستیابی به کمیته‌ی هزینه سالیانه کلی و کمیته وزن استفاده کردند، در این مطالعه کارایی بهتر الگوریتم رقابت استعماری در مقایسه با الگوریتم ژنتیک نشان داده شد. راثو و همکاران [۱۲]، از الگوریتم (TLBO)، جهت دستیابی به بیشینه کارایی و کمیته هزینه سالیانه کلی به عنوان دو تابع هدف در طراحی و بهینه‌سازی مبادله‌کن‌های گرمای صفحه‌ای پرده‌دار با پرده‌های کنگره‌ای و مبادله‌کن‌های پوسته-لوله استفاده کردند. نتایج حاصله، بهبود نتایج را نسبت به الگوریتم ژنتیک نشان داد.

فام و همکاران [۱۳]، اولین کاربرد الگوریتم زنبور عسل را در طراحی بهینه‌ی مسایل مکانیکی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی روی دو مسأله استاندارد طراحی مکانیکی، یکی

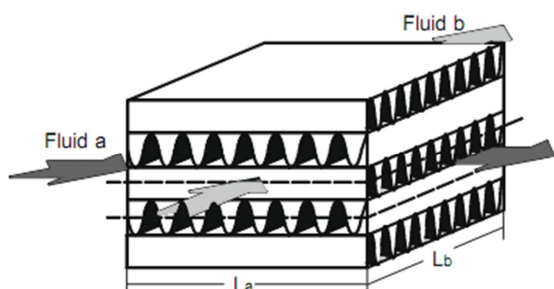
¹ Compact heat exchangers

² Cryogenic

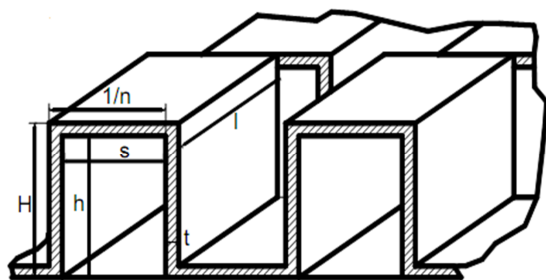
به‌عنوان گاز ایده‌آل عمل می‌کنند. همچنین برای به حداقل رسانیدن تلفات گرمایی به محیط، تعداد لایه‌های پره سمت هوا یکی بیشتر از تعداد لایه‌های سمت گاز فرض می‌شود ($N_b = N_a + 1$).

۲-۱- مدل‌سازی گرمایی

شکل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب نمایی از یک مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار جریان متقاطع و پره‌های کنگره‌ای با سطح مقطع مستطیلی را نشان می‌دهند.



شکل ۱- نمایی از یک مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار [۲]



شکل ۲- نمایی از یک پره کنگره‌ای [۲]

۳- معادلات حاکم

با فرض هندسه‌ی مشابه در هر دو سمت مبادله‌کن، مساحت‌های انتقال حرارت به صورت زیر قابل محاسبه است [۲]:

$$A_a = L_b L_a N_a [1 + \{2n_a (H_a - t_a)\}] \quad (1)$$

$$A_b = L_b L_a N_b [1 + \{2n_c (H_c - t_c)\}] \quad (2)$$

مساحت جریان آزاد، برای هندسه‌ی مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار مطرح‌شده در این پژوهش به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$A_{ff,a} = (H_a - t_a)(1 - n_a t_a) L_b N_a \quad (3)$$

$$A_{ff,b} = (H_b - t_b)(1 - n_b t_b) L_a N_b \quad (4)$$

بنابراین مساحت کلی انتقال حرارت مبادله‌کن گرما به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$A = A_a + A_b \quad (5)$$

برای مبادله‌کن گرمای جریان متقاطع با هر دو جریان غیر مخلوط، کارایی به‌صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۵]:

مسأله‌ی طراحی جوش تیر یک سر گیردار و دیگری طراحی فنر مارپیچی کار کردند. هدف از این کار محک زدن الگوریتم زنبور عسل در مقابل سایر روش‌های بهینه‌سازی بود. نتایج به‌دست آمده، عملکرد بالای این الگوریتم را نشان داد. در مطالعه‌ی دیگر فام و همکاران [۱۴]، اولین کاربرد الگوریتم زنبور عسل را برای بهینه‌سازی مسایل چند هدفه‌ی ارایه‌دادند. آنها مسأله‌ی طراحی جوش یک تیر را با استفاده از این تکنیک انجام دادند که به نتایج بسیار خوبی نسبت به دیگر روش‌های بهینه‌سازی رسیدند. معمولاً بهینه‌سازی با تعریف تابع هدف شروع می‌شود که این تابع هدف برای مسایل مختلف، متفاوت می‌باشد. توابع هدف به‌صورت بیشینه یا کمینه کردن یک متغیر خاص تعریف می‌شوند. در حالتی بهینه‌تر می‌توان چند تابع هدف را به‌طور همزمان به‌کار برد، در این جاست که توابع چند هدفه مطرح می‌شود. در این مقاله بهینه‌سازی با استفاده از تکنیک MOBA برای به‌دست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌ها صورت گرفته است. در روش MOBA هدف به‌دست آوردن جبهه‌ی پاریتو می‌باشد. این جبهه شامل مجموعه‌ای از جواب‌هاست به‌گونه‌ای که هیچ‌کدام بر یکدیگر غالب نیستند و از طرفی حداقل یک جواب در این جبهه وجود دارد که از هر حل دیگری به‌غیر از حل‌های موجود در جبهه، بهتر می‌باشد.

در این مطالعه یک مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار مدل‌سازی شده است. بهینه‌کردن پارامترهای مؤثر در مبادله‌کن‌های حرارتی صفحه‌ای پره‌دار در یک نمونه مورد مطالعه بررسی شده است. در نمونه مورد مطالعه، بهینه‌سازی به‌منظور دستیابی همزمان به کمینه تعداد واحدهای تولید آنتروپی و هزینه‌ی سالیانه کلی انجام شده است و نتایج حاصله توسط جبهه بهینه پاریتو ارایه‌گردیده است، به‌طوری‌که طراحان می‌توانند با در دست داشتن این منحنی‌ها یا روابط به‌دست آمده بین توابع هدف با استفاده از این منحنی‌ها، طراحی‌های بهینه را با توجه به نیازمندی‌هایشان انتخاب کنند. به‌منظور اثبات عملکرد خوب الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل، یک نمونه مورد مطالعه از مراجع مطرح شده است [۶]. تا کنون الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل جهت بهینه‌سازی مبادله‌کن‌های صفحه‌ای پره‌دار آزموده نشده است. در این مطالعه از این الگوریتم برای مبادله‌کن‌های صفحه‌ای پره‌دار استفاده شده است.

۲- مدل‌سازی مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار

در تحقیق حاضر به‌این دلیل که دمای خروجی سیال‌ها نامعلوم است، از روش ϵ -NTU جهت تحلیل مبادله‌کن گرما در فرآیند بهینه‌سازی استفاده شده است. باید به این نکته توجه کنیم که در این مطالعه، مبادله‌کن گرما در شرایط حالت پایدار کار می‌کند و هر دو سیال در سمت جریان‌های گرم و سرد

$$\Delta P_a = \frac{4f_a L_a G_a^2}{2\rho_a D_{a,a}} \quad (16)$$

$$\Delta P_b = \frac{4f_b L_b G_b^2}{2\rho_b D_{a,b}} \quad (17)$$

۳-۲- تخمین هزینه

تابع هزینه‌ی سالیانه کلی به صورت مجموعه هزینه سرمایه‌گذاری ناشی از هزینه سطح مورد نیاز برای انتقال حرارت و هزینه‌ی انرژی مصرفی برای غلبه بر افت فشار ناشی از اصطکاک سیال (انرژی پمپاژ) به صورت زیر است [۶]:

$$C_{total} = C_{inv} + C_{ope} \quad (18)$$

$$C_{inv} = C_A \times A^n \quad (19)$$

$$C_{ope} = \left(k_{el} \tau \frac{\Delta PV_t}{\eta} \right)_b + \left(k_{el} \tau \frac{\Delta PV_t}{\eta} \right)_a \quad (20)$$

که در این روابط C_{inv} ، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه، C_{ope} ، هزینه‌ی عملکرد برای غلبه بر افت فشارها و C_{total} ، هزینه‌ی سالیانه کلی می‌باشند. همچنین، C_A ، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری مبادله‌کن گرما در واحد سطح، A ، مساحت انتقال حرارت کلی، n ، توان افزایش غیر خطی با افزایش سطح، k_{el} ، قیمت انرژی الکتریکی، τ ، ساعتهای عملکرد مبادله‌کن گرما در سال، ΔP ، افت فشار، V_t ، آهنگ حجمی جریان و η ، بازده فن یا پمپ می‌باشد.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل

الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل، یک الگوریتم جستجوی هوشمند دسته جمعی برای حل مسایل بهینه‌سازی است که اولین بار در سال ۲۰۰۶ توسعه یافت [۱۷]. این الگوریتم، شبیه‌سازی رفتار جستجوی غذای گروههای زنبور عسل در طبیعت می‌باشد. این الگوریتم، توانایی بهینه‌سازی مسایل یک یا چند هدفه را داراست. ویژگی‌های خاص این روش سبب می‌شود که نتوانیم آن را یک جستجوگر ساده تصادفی و تقلیدی بی‌دلیل از طبیعت بدانیم. الگوریتم زنبور عسل جهت بهینه‌سازی چندهدفه به تعدادی پارامتر بستگی دارد که این پارامترها قبل از شروع الگوریتم باید توسط کاربر مشخص شوند. این پارامترها در جدول ۱ شرح داده شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای موجود در الگوریتم زنبور عسل

n	تعداد جمعیت زنبورهای اکتشاف
m	تعداد محل‌های انتخاب‌شده از بین n مکان مشاهده شده
nsp	تعداد زنبورهای فرستاده شده به m مکان انتخاب‌شده
ngh	شعاع هر گلزار شامل محل بازدید و همسایگی‌اش
i _{max}	تعداد دفعات تکرار الگوریتم

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C_r}\right) NTU^{0.22} \times \{ \exp(-C_r NTU^{0.78}) - 1 \} \right] \quad (6)$$

که در معادله اشاره شده در بالا:

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

با ناچیز در نظر گرفتن مقاومت گرمایی دیواره و فاکتور رسوب، تعداد واحدهای انتقال طبق رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{1}{NTU} = \frac{C_{min}}{AU} = C_{min} \left[\frac{1}{(hA)_a} + \frac{1}{(hA)_b} \right] \quad (7)$$

ضریب انتقال حرارت به طور عمومی در جمله‌هایی از رابطه کلبرن^۳ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h = j C_p G Pr^{-2/3} \quad (8)$$

G ، در این رابطه، شار جرمی است که طبق رابطه‌ی زیر قابل بیان است:

$$G = \frac{m}{A_{ff}} \quad (9)$$

روابط زیادی برای ارزیابی ضریب کلبرن و فاکتور اصطکاک برای پره‌های کنگره‌ای موجود است. رابطه جوشی و وب^۴ برای بیان ضریب کلبرن در جریان آرام و اگر $Re < 150$ به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$j = 0.53 (Re)^{-0.5} (l/D_a)^{-0.15} (s/H - t)^{-0.14} \quad (10)$$

و در جریان آشفته اگر $Re > 1500$ به صورت زیر است:

$$j = 0.21 (Re)^{-0.4} (l/D_a)^{-0.24} (t/D_a)^{0.02} \quad (11)$$

در این معادلات قطر هیدرولیکی جهت محاسبه عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_h = \frac{2(s-t)(H-t)}{(s+(H-t)) \frac{(H-t)t}{l}} \quad (12)$$

و عدد رینولدز به صورت زیر قابل بیان است:

$$Re = \frac{G D_a}{\mu} = \frac{m D_a}{A_{ff} \mu} \quad (13)$$

۳-۱- روابط افت فشار

رابطه جوشی و وب برای بیان ضریب اصطکاک در جریان آرام (اگر $Re > 1500$) به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$f = 8.12 (Re)^{0.74} (l/D_a)^{0.41} (s/H - t)^{-0.02} \quad (14)$$

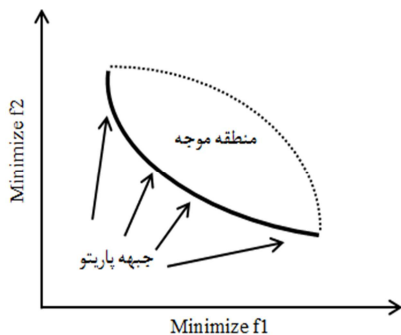
در جریان آشفته رابطه جوزی و وب (اگر $Re > 1500$) به صورت زیر می‌باشد:

$$f = 1.12 (Re)^{-0.36} (l/D_a)^{-0.65} (t/D_a)^{0.17} \quad (15)$$

بنابراین، افت فشار اصطکاک برای دو سمت سیال عبارتست از:

¹ Colburn

² Joshi and Webb



شکل ۴- جبهه پاریتو برای کمینه سازی دو تابع هدف

۵-۳- روند کلی الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در بهینه‌سازی چند هدفه

برای این منظور، ابتدا مجموعه‌ی اولیه، شامل n عضو تصادفی، ساخته شده و مقدار همه‌ی توابع هدف برای تمامی اعضا محاسبه می‌گردد. سپس از بین مجموعه‌ی اولیه، اعضایی که بر هم غالب نیستند به‌عنوان جواب‌های پاریتو در نظر گرفته می‌شوند. در مرحله‌ی بعد، تمامی n عضو موجود در مجموعه با یکدیگر مقایسه و امتیازدهی می‌شوند. در گام بعد، m عضو که بالاترین امتیاز را در بین اعضای مجموعه دارند، انتخاب می‌گردند. در مرحله‌ی بعد، تعداد nsp انتخاب، در همسایگی عضو i ام در نظر گرفته می‌شود و همه‌ی توابع شایستگی این nsp عضو، محاسبه می‌گردند. سپس، مجموعه‌ی شامل عضو i ام و nsp عضو انتخابی در مسابقه شرکت می‌نمایند. در این مسابقه تمامی $nsp+1$ عضو با یکدیگر در تمامی توابع شایستگی مقایسه می‌شوند. در نهایت، عضوی که بیشترین امتیاز را دارا باشد، جایگزین عضو i ام در هر نسل می‌شود. با اعمال این روند برای تمامی m عضو در هر نسل و اضافه نمودن $n-m$ عضو به‌صورت تصادفی، نسل جدید ساخته می‌شود. پس از ساخته شدن نسل جدید، هر یک از اعضای نسل جدید با مجموعه جواب‌های پاریتو مقایسه می‌شوند. در صورتی که عضوی از نسل جدید بر عضوی از جواب‌های پاریتو غالب باشد، اعضای مذکور از مجموعه جواب‌های پاریتو حذف و عضو غالب جایگزین می‌گردد. مراحل اصلی الگوریتم زنبور عسل برای حل مسایل بهینه‌سازی چند هدفه، به‌طور خلاصه توسط فلوچارت در شکل ۵ نمایش داده شده است [۱۸].

۵-۴- توابع هدف، پارامترهای طراحی و قیود

در حالت کلی یک مسأله بهینه‌سازی، به‌صورت زیر تشریح می‌گردد. یک مقدار بیشینه از تابع f برابر با یک مقدار کمینه از تابع $-f$ می‌باشد. بنابراین تمام مسایل بهینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۲۲]:

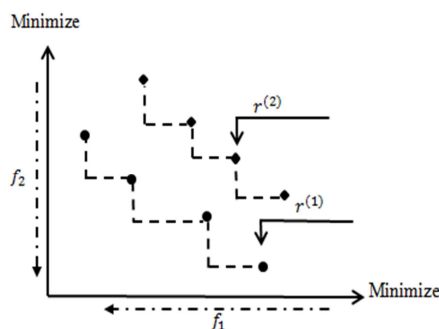
$$\text{minimize } f_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (21)$$

۵-۱- الگوریتم زنبور عسل به منظور بهینه‌سازی چند هدفه

در اغلب الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه، از مفاهیم امتیازدهی و پاسخ‌های پاریتو استفاده می‌شود. در ادامه به‌طور مختصر این مفاهیم مورد بررسی قرار خواهند گرفت [۱۹].

۵-۱- نحوه امتیازدهی جمعیت اکتشافی

رتبه ۱ (r^1)، شامل جمعیت‌هایی است که بر یکدیگر غالب نیستند ولی بر تمام جمعیت‌های باقی، غالب هستند. برای به دست آوردن رتبه ۲ (r^2)، جمعیت‌های موجود در رتبه ۱ به صورت موقت کنار گذاشته می‌شوند و بقیه جمعیت‌هایی که بر هم غالب نیستند را امتیازدهی می‌کنیم. این کار را تا آنجا ادامه می‌دهیم که تمامی جمعیت رتبه‌بندی شوند. طرحواره این رتبه‌بندی در شکل ۳ برای مسئله کمینه‌سازی دو تابع هدف نشان داده شده است.



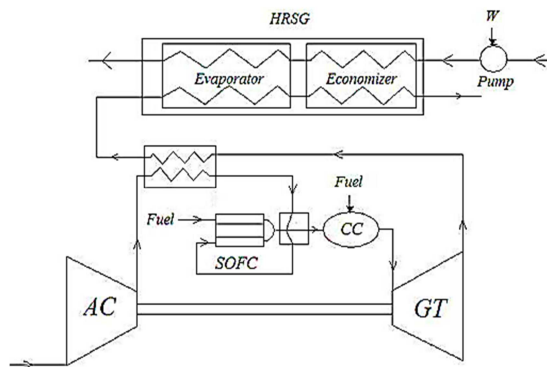
شکل ۳- نحوه امتیازدهی جمعیت در کمینه‌سازی دو تابع هدف

۵-۲- منحنی بهینه پاریتو

در مسایل چند هدفه، به‌جای یک تابع هدف، چندین تابع هدف باید به صورت همزمان بهینه شوند. در چنین شرایطی معمولاً مسأله دارای بیش از یک جواب بهینه خواهد بود که به آنها جواب‌های بهینه پاریتو گفته می‌شود. منحنی بهینه پاریتو، در واقع مفهومی اقتصادی دارد. حد مطلوب پاریتو، وضعیتی است که در آن نتوان رفاه یک شخص را افزایش داد مگر به قیمت کاهش در رفاه دیگری. مطابق شکل ۴، دسته جواب‌های به‌دست آمده که یک منحنی را تشکیل می‌دهند، بهترین جواب‌ها را شامل می‌شوند. ضمن اینکه مجموعه جواب‌های موجود در منحنی، نسبت به یکدیگر هیچ‌گونه برتری ندارند (در اصطلاح غیر غالبند).

۶- نمونه‌ی مورد مطالعه

جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، یک نمونه‌ی مورد مطالعه از مراجع مطرح شده است [۱]. یک مبادله‌کن جریان متقاطع گاز- هوا، برای بازیابی حرارت گاز و پیش‌گرمایش هوا، در یک سیستم تولید همزمان برق و حرارت با پیل سوختی اکسید جامد، در نظر گرفته شده است. در هر دو سمت هوا و گاز از پره کنگره‌ای با مشخصات یکسان استفاده شده است. پرها و صفحات جداکننده، هر دو از فلز اینکونل-۶۲۵، با ضریب هدایت گرمایی 18 W/m.K ساخته شده‌اند. بهینه‌سازی چندهدفه مبادله‌کن گرمای صفحه‌ای پره‌دار بر اساس دستیابی همزمان به بیشینه کارایی و کمینه هزینه سالیانه کلی سیستم (مجموع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه عملکرد) مورد بررسی قرار می‌گیرد. شمایی از مبادله‌کن گرما در سیکل تولید همزمان برق و حرارت با پیل سوختی اکسید جامد در شکل ۶ نمایش داده شده است. تعداد شش متغیر طراحی شامل طول جریان گرم و سرد مبادله‌کن گرما، ارتفاع مبادله‌کن، گام پره، ارتفاع پره و طول نیزه پره جهت بهینه‌سازی مطرح می‌شوند. محدوده‌ی بالا و پایین پارامترهای طراحی در جدول ۲ لیست شده‌اند. این محدوده‌ها اختیاری‌اند و می‌توان مقادیر آن را تغییر داد ولی در هر صورت سعی شده است که محدوده‌ی بالا و پایین آن، پیرامون نقاط مرجع ۱ باشند. همچنین شرایط عملکرد در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۶- شمایی از سیکل تولید همزمان برق و حرارت با پیل سوختی اکسید جامد [۱]

جدول ۲- محدوده تغییرات پارامترهای طراحی [۱]

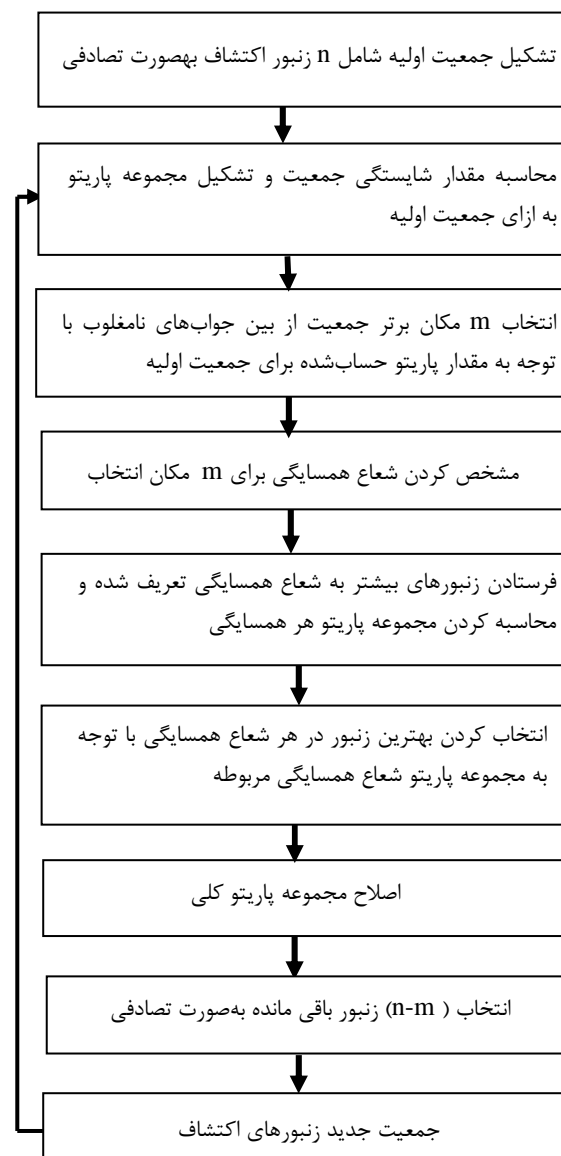
پارامتر طراحی	محدوده تغییرات
گام پره (mm)	۱-۲,۵
ارتفاع پره (mm)	۲,۵-۸
طول نیزه پره (mm)	۲-۳,۵
طول جریان گرم (m)	۰,۲-۰,۴
طول جریان سرد (m)	۰,۲-۰,۴
ارتفاع مبادله‌کن (m)	۰,۷-۱,۲

$$\text{subject to } C_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

$$h_k(x) \geq 0 \quad k = 1, 2, \dots, q \quad (23)$$

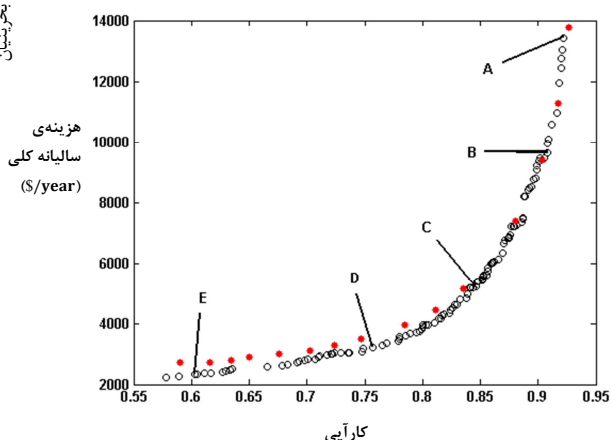
$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (24)$$

که در (۲۱)، $f_i(x)$ ها توابع هدف، در (۲۲)، $C_j(x)$ ها قیود تساوی، در (۲۳)، $h_k(x)$ ها قیود نامساوی و در (۲۴) X بردار ستونی از n متغیر (بردار طراحی) می‌باشند. کلمه *minimize* به این معنا است که می‌خواهیم توابع هدف را به‌طور همزمان کمینه کنیم. در معادله‌ی (۲۱)، اگر i برابر یک باشد، مسأله بهینه‌سازی را تک‌هدفه می‌نامند که تنها بهینه کردن یک تابع هدف تحت محدودیت‌ها و قیود مسأله مدنظر می‌باشد.



شکل ۵- فلوچارت الگوریتم زنبور عسل برای مسایل چند هدفه [۱۴]

هزینه‌ی سالیانه کلی و بیشینه کردن کارایی داراست. بنابراین، نتایج طراحی حاصل از این مطالعه در محدوده‌ی C-E در هر دو تابع هدف، بهتر از نتایج مرجع [۶] می‌باشد. اما اگر تنها یک خواسته مدنظر باشد، سایر نقاط طراحی نیز می‌توانند به‌عنوان یک جواب قابل قبول انتخاب گردند. در حالت کلی نیز نتایج این مطالعه دارای هزینه‌ی سالیانه کلی کمتری (نقطه E) می‌باشد. کمینه‌ی هزینه‌ی سالیانه کلی (نقطه E) به‌دست آمده در این مطالعه، ۱۳٪ کمتر از NSGA-II می‌باشد. این بدین معناست که اگر تابع هزینه‌ی سالیانه کلی به‌عنوان یک تابع هدف جداگانه یا تک هدفه مورد بررسی قرار گیرد، نتایج حاصل از این مطالعه بهتر از نتایج مرجع [۶] خواهد بود.



شکل ۷- منحنی بهینه‌ی پاریتو برای بیشینه‌ی کارایی و کمینه‌ی هزینه‌ی سالیانه کلی با الگوریتم MOBA

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل در طراحی بهینه‌ی مبادله‌کن‌های حرارتی صفحه‌ای پره‌دار نشان داده شد. بر اساس کاربردها، پارامترهای طراحی متفاوتی به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی مطرح شدند. از آنجایی که هر افزایشی در کارایی منجر به افزایش در هزینه‌ی سالیانه کلی می‌گردد، بنابراین توابع مطرح شده در تعارض با یکدیگرند و یک جواب تنها و منحصر به فرد، نمی‌تواند هر دو توابع هدف را به‌طور همزمان ارضا کند. بنابراین، بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل جهت بهینه‌سازی سیستم و دستیابی به یک سری از حل‌های بهینه یا جبهه‌ی پاریتو به‌کار رفته است.

جدول ۳- پارامترهای عملکرد انتخاب شده [۱]

پارامتر	بعد	مقدار
دبی حجمی هوای گرم	m^3 / s	۳/۴۹۴
دبی حجمی هوای سرد	m^3 / s	۱/۳۵۸
دمای هوای گرم ورودی	$^{\circ}C$	۱۱۷۳
دمای هوای سرد ورودی	$^{\circ}C$	۴۷۳
فشار ورودی در سمت گرم	kPa	۱۶۰
فشار ورودی در سمت سرد	kPa	۲۰۰
هزینه بر واحد سطح	$\$/m^2$	۱۰۰
توان افزایش غیر خطی سطح	-	۰.۶
ساعات کارکرد در سال	$h / year$	۵۰۰۰
قیمت برق	$\$/MWh$	۲۰
بازده کلی کمپرسور	-	۰.۶

۷- نتایج

در این بخش، بهینه‌سازی چندهدفه مبادله‌کن گرما صفحه‌ای پره‌دار به‌منظور دستیابی به حداقل هزینه‌ی کل سیستم (مجموع هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌ی عملکرد) و حداکثر کارایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش الگوریتم زنبور عسل چندهدفه برای به‌دست آوردن مجموعه‌ای از نقاط غیر غالب به نام منحنی پاریتو به‌کار گرفته شده است. نقاط این منحنی شامل تمام طراحی‌های بهینه‌ی دارای بیشینه‌ی کارایی و کمینه‌ی هزینه‌ی سالیانه کلی می‌باشد. الگوریتم زنبور عسل در نرم‌افزار MATLAB، نوشته شده است. نتایج بهینه‌ی حاصله با مراجع مقایسه شده است [۶].

در این مطالعه، هندسه‌ی پره شامل گام، ارتفاع و طول پره، طول جریان‌های گرم و سرد و همچنین ارتفاع مبادله‌کن به‌عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شد. همچنین، از پره‌های با شکل هندسی یکسان در هر دو سمت مبادله‌کن استفاده شد. شکل ۷، نتایج حاصل از بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که در آن، نتایج مرجع با رنگ سیاه و نتایج حاصل از این مطالعه با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. نتایج پنج نقطه‌ی نمونه از A-E به همراه نتایج مرجع [۶] با شرایط اولیه‌ی یکسان در جدول ۴ لیست شده‌اند.

همان‌طور که دیده می‌شود، طراحی در نقطه C دارای کارایی یکسان با مرجع [۱] است. ضمن اینکه هزینه‌ی سالیانه کل، ۴۴٪ کمتر است. بنابراین طراحی انجام شده، دارای عملکرد بهتری نسبت به طراحی اولیه انجام شده در مرجع [۱] می‌باشد. همچنین، در نقاط طراحی C تا E نتایج حاصل از این مطالعه در عین داشتن کارایی بالاتر، هزینه‌ی پایین‌تری نسبت به نتایج الگوریتم NSGA-II در طراحی بهینه بر اساس کمینه‌کردن

جدول ۴- نتایج جبهه‌ی پاریتو در نقاط نمونه A-E برای بیشینه‌ی کارایی و کمینه‌ی هزینه‌ی سالیانه کلی

هزینه‌ی سالیانه کلی (\$/year)		بازده		پارامتر
۹۴۰۶		۰٫۸۴۶		مرجع [۱]
NSGA-II	MOBA	NSGA-II	MOBA	الگوریتم
۱۳۷۹۸	۱۳۴۱۰	۰٫۹۲۷۲	۰٫۹۲۲۲	نقطه A
۹۴۱۸٫۸	۹۶۲۱	۰٫۹۰۵	۰٫۹۰۷۶	نقطه B
۵۴۶۷٫۳	۵۲۱۴	۰٫۸۴۵۸	۰٫۸۴۶۶	نقطه C
۳۴۹۰٫۲	۳۲۰۹	۰٫۷۵	۰٫۷۵۶۸	نقطه D
۲۶۷۵٫۵	۲۳۲۴	۰٫۵۹۲۱	۰٫۶۰۳۲	نقطه E

[5] Xie, G. N., Sunden, B., Wang Q.W., "Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm", Applied Thermal Engineering, vol. 28, pp. 895-906, 2008.

[6] صنایع، سپهر، حاج عبداللهی، حسن، بهینه‌سازی فنی و اقتصادی مبادله‌کن گرمای فشرده و تخمین پارامترهای بهینه با استفاده از شبکه‌های عصبی، هفدهمین کنفرانس سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، اردیبهشت ۱۳۸۸.

[7] Ahmadi, P., Hajabdollahi, H., "cost and entropy generation minimization of a cross flow plate fin heat exchanger using multi objective genetic algorithm", Journal of Heat Transfer, vol. 133, 2011.

[8] Najafi, H., Najafi, B., Hoseinpoori, P., "Energy and cost optimization of a plate fin heat exchanger using genetic algorithm", Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 1839-1847, 2011.

[9] Rao, R. V., Patel, V. K., "Thermodynamic optimization of cross flow plate-fin heat exchanger using a particle swarm optimization algorithm", International Journal of Thermal Science, vol. 49, no. 9, pp. 1712-1721, 2010.

[10] Peng, H., Xiang, L., "Optimal design approach for the plate-fin heat exchangers using neural networks cooperated with genetic algorithms", Applied Thermal Engineering, vol. 28, pp. 642-650, 2008.

[11] Yousefi, M., Darus, A. N., Mohammadi, H., "An imperialist competitive algorithm for optimal design of plate-fin heat exchangers", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, no. 11-12, pp. 3178-3185, 2012.

[12] Rao, R. V., Patel, V. K., "Multi-objective optimization of heat exchangers using a modified teaching-learning based optimization algorithm", Applied Mathematical Modeling, pp.1-16, 2012.

[13] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., "Optimal Design of Mechanical Components Using the Bees algorithm", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 28, pp. 101-114, 2009.

مزیت اصلی مطالعه‌ی انجام شده این است که یک محدوده‌ی گسترده از حل‌های بهینه‌ی به‌دست آمده است و طراحان می‌توانند بر اساس کاربرد و هزینه سالیانه کلی سیستم، بهترین پارامترهای طراحی را انتخاب کنند. جهت آزمودن توانایی و دقت این الگوریتم یک نمونه مورد مطالعه از منابع انتخاب شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، کارایی بهتر الگوریتم پیشنهادی نشان داده شد. فرآیند طراحی ارائه شده برای مبادله‌کن‌های گرمای صفحه‌ای پره‌دار در این مطالعه با استفاده از الگوریتم زنبور عسل، می‌تواند برای انواع دیگر مبادله‌کن‌های گرما از قبیل مبادله‌کن‌های گرمای لوله‌ای پره‌دار، مبادله‌کن‌های گرمای پوسته لوله‌ای و رکپراتورها (مبادله‌کن‌های انتقال مستقیم و برخورد غیرمستقیم حالت پایا) به‌خوبی به‌کار رود. در عین حال انواع دیگر پره‌ها از قبیل پره‌های ساده، سوراخ‌دار، موجی شکل و کرکره‌ای می‌توانند در هر دو سمت جریان سرد و گرم به‌کار روند. بنابراین از الگوریتم زنبور عسل می‌توان در طراحی انواع مختلف مبادله‌کن‌های حرارتی استفاده نمود.

مراجع

- [1] Shah, R. K., Sekulic, D. P., "Fundamentals of heat Exchanger design", New York, John Wiley, 2003.
- [2] Mishra, M., Das, P. K., Sarangi, S., "Second law based optimization of cross flow plate-fin heat exchanger design using genetic algorithm", Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 2983-2989, 2009.
- [3] Sanaye, S., Hajabdollahi, H., "Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm", Applied Energy, vol. 87, no. 6, pp. 1893-1902, 2010.
- [4] Yousefi, M., Enayatifar, R., Darus, A. N., "Optimal Design of plate-fin Heat Exchangers by a hybrid evolutionar algorithm", International Communications in Heat and Mass Transfer, pp. 1-6, 2011.

- [14] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., "Multi-Objective Optimization using the Bees Algorithm", In 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems: Whittles, Dunbeath, Scotland, vol. 242, pp. 111-116, 2007.
- [15] Incropera, F. P., DeWitt, D.P., "Fundamentals of heat and mass transfer", John Wiley and Sons, Inc, 1998.
- [16] Joshi, H.M., Webb, R. L., "Heat transfer and friction in the offset strip-fin heat exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 30, no.1, pp.69-84, 1987.
- [17] Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., and Zaidi, M., "The Bees Algorithm. A Novel Tool for Complex Optimization Problems", In Proceedings of the 2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems, Elsevier Oxford, pp. 454-459, 2006.
- [18] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., "Multi-Objective optimization using the Bees Algorithm", In 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines. and Systems (IPROMS 2007): Whittles, Dunbeath, Scotland, vol. 242, pp. 111-116, 2007.
- [19] Konak, A., Coit, D., Smith, A., "Multi-objective optimization using genetic algorithm", a tutorial, Reliability Engineering and System Safety, vol. 91, pp. 992-1007, 2006.