



استفاده از ارزش فعلی خالص به عنوان یک تابع هدف تنها برای بهینه‌سازی ترمو-اقتصادی رکوپراتور صفحه پره‌دار میکروتوربین

پیمان مقصودی^{۱*} و پدram حنفی‌زاده^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

چکیده

در این مقاله، رکوپراتور یک میکروتوربین 200 kW با در نظر گرفتن ارزش فعلی خالص به عنوان تابع هدف، با الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات بهینه‌سازی شده است. مبدل حرارتی صفحه پره‌دار با پره نواری و آرایش جریان‌های عمود و مخالف برای بهینه‌سازی انتخاب شده است. گام پره، ارتفاع پره، طول نوار، طول مسیر جریان رکوپراتور، ارتفاع و عرض رکوپراتور، به عنوان شش پارامتر طراحی در نظر گرفته شده‌اند. برای بررسی اثر هر یک از متغیرهای طراحی بر تابع هدف، آنالیز حساسیت انجام شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات از نظر حجم محاسبات و مقدار بهینه بدست آمده عملکرد بهتری دارد. با توجه به اینکه تابع هدف انتخاب شده در این مسئله، تابعی از کارایی و هزینه کل رکوپراتور است، نتایج بدست آمده از این تحقیق، با نتایج بهینه‌سازی ترمو-اقتصادی مقایسه شده‌اند. مقایسه‌های صورت گرفته بر مبنای معیارهای ارزش فعلی خالص و بازده سیکل می‌باشند و بهتر بودن نتایج کار حاضر را از نظر فنی و اقتصادی نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که ارزش فعلی خالص و بازده سیکل در کار حاضر، حداکثر تا ۱۱.۵۴٪ و ۱۱.۶۹٪ افزایش یافته‌اند.

کلمات کلیدی: رکوپراتور؛ ارزش فعلی خالص؛ الگوریتم ژنتیک؛ بهینه‌سازی اجتماع ذرات.

Using Net Present Value as a Single Objective Function for Thermo-Economic Optimization of a Plate-Fin Recuperator in Microturbine

P. Maghsoudi^{1*}, P. Hanafizadeh²

¹ Master of Science, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

² Assistant Professor., School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

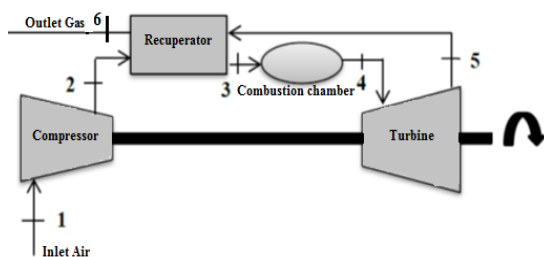
Abstract

In this paper, genetic and particle swarm algorithms were applied to optimize a recuperator in a 200 kW microturbine, with the net present value (NPV) considered as the objective function. Examined for the optimization purposes is a plate-fin heat exchanger of offset strip fin configuration as well as counter- and cross-flow arrangements. Fin pitch, fin height, fin offset length, recuperator flow length, recuperator width, and recuperator height were considered as the six design parameters investigated. A sensitivity analysis is performed in order to investigate the effect of design parameters on the objective function. Comparing the results of genetic algorithm (GA) to those of particle swarm algorithm indicated that, the particle swarm optimization (PSO) approach had succeeded to achieve better results from computations' volume and optimum value perspectives. As the used objective function in this research was a function of total cost and efficiency of the recuperator, the results of the present research were compared to thermo-economic optimization results. Being based on NPV and cycle efficiency criteria, the comparisons indicated superiority of the results of the present study, when viewed from technical and economic perspectives. Results show that in the present study NPV and cycle efficiency have increased up to 11.54% and 11.69%.

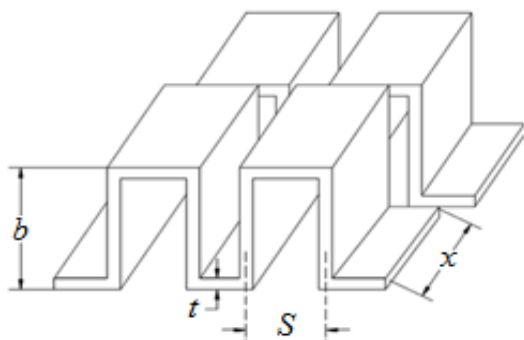
Keywords: Recuperator; Net Present Value; Genetic Algorithm; Particle Swarm Optimization.

۱- مقدمه

حرارت است. انقطاع لایه مرزی و در نتیجه ایجاد لایه مرزی نازکتر و افزایش ضریب انتقال حرارت از دیگر راه‌های افزایش نرخ انتقال حرارت است که در برخی از پره‌های فوق وجود دارد. شکل ۲، یک پره نواری را نشان می‌دهد که در این تحقیق از آن استفاده شده است.



شکل ۱ - طرح کلی از سیکل میکروتوربین به همراه رکوپراتور



شکل ۲- مشخصات هندسی پره نواری [۹]

در سال‌های اخیر کارهای مختلفی روی مشخصات ترموهیدرولیکی رکوپراتورهای صفحه پره‌دار و بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده است. منگلیک و برگلز، روابطی را برای ضریب کولبرن و فاکتور اصطکاکی پره‌های نواری ارائه کردند [۶]. از مزایای روابط ارائه شده این است که نیاز به توصیف رژیم جریان (آرام، گذرا و درهم) برای یک شرایط عملکرد خاص نمی‌باشد و از این‌رو در کاربردهای علمی مفید است. تراورسا و ماساردو، هم روش جدیدی را برای بهینه‌سازی رکوپراتورهای مورد استفاده در میکروتوربین‌ها از نقطه‌نظر فنی و اقتصادی ارائه کردند [۴]. آنها روش فوق را در قالب

میکروتوربین‌ها، از ابزارهای تولید برق در مقیاس کوچک می‌باشند که توان تولیدی آن‌ها در محدوده ۵ kW تا ۲۰۰ kW است [۱]. سیکل ساده میکروتوربین گاز شامل، یک ژنراتور، کمپرسور، محفظه احتراق و توربین است که در آن همه با هم برای تولید برق کار می‌کنند. نحوه کار سیکل ساده توربین گازی، بدین صورت است که ابتدا هوا وارد کمپرسور شده، در آنجا فشرده می‌شود، سپس هوای فشرده با سوخت مخلوط می‌شود و در محفظه احتراق شروع به سوختن می‌کند. در مرحله بعد، گازهای داغ حاصل از احتراق در توربین منبسط شده، به سرعت از آن می‌گذرند. در این مرحله، انرژی شیمیایی موجود در سوخت به انرژی مکانیکی تبدیل شده، در نهایت منجر به تولید کار می‌شود [۲]. محدوده بازدهی سیکل ساده میکروتوربین گازی، ۱۶٪ تا ۲۰٪ است، به همین دلیل استفاده از آن مرسوم نمی‌باشد [۳]. یکی از راه‌های مهم برای افزایش بازده میکروتوربین گازی، استفاده از حرارت گازهای خروجی توربین است. در این روش، هوای خروجی از کمپرسور از داخل مبدل حرارتی عبور می‌کند که با گازهای خروجی از توربین گرم می‌شود، سپس هوای گرم شده وارد محفظه احتراق می‌شود و با توجه به گرم بودن هوا، عمل اختلاط با سوخت و احتراق بهتر انجام شده، سوخت کمتری مصرف می‌شود و بدین صورت بازده افزایش می‌یابد. در شکل ۱، سیکل میکروتوربین گازی به همراه رکوپراتور (بازیاب حرارتی) نشان داده شده است. استفاده از بازیاب حرارتی در میکروتوربین برای رسیدن به بازده الکتریکی، ۳۰٪ یا بیشتر ضروری است [۴]. از طرفی دیگر افزودن رکوپراتور به سیکل، حدود ۳۰٪ به هزینه‌های میکروتوربین اضافه می‌کند [۴].

مبدل‌های صفحه پره‌دار به دلیل کارایی بالا، فشردگی، وزن کم و حجم کوچک به طور گسترده‌ای در صنایع مختلفی نظیر، میکروتوربین، نفت، کرایوژنیک^۱ (تبرید در دمای خیلی کم)، پتروشیمی و هوا فضا استفاده می‌شوند [۵]. پره‌های مختلفی در این نوع مبدل استفاده می‌شود که برخی از انواع معمول آن عبارتند از: پره ساده (مستطیلی و مثلثی)، نواری، کرکره‌ای، سوراخ‌دار، موجی و سوزنی. در همه پره‌های گفته شده، افزایش سطح انتقال حرارت از عوامل افزایش نرخ انتقال

^۱ Cryogenics

در مقاله حاضر، رکوپراتور یک میکروتوربین 200 kW از نظر فنی و اقتصادی و با استفاده از یک تابع هدف تنها و بدون استفاده از ضرایب وزنی بهینه‌سازی شده است. رکوپراتور انتخاب شده، یک مبدل صفحه پره‌دار با پره نواری به همراه دو آرایش جریان عمود و مخالف است. ارزش فعلی خالص^۲ رکوپراتور به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده، از الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی آن استفاده شد. تابع هدف استفاده شده در این تحقیق، از نوآوری‌های آن است که در هیچ یک از کارهای پیشین استفاده نشده است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق، بطور همزمان کارایی و هزینه مصرفی را در قالب یک تابع هدف تنها (بدون استفاده از ضرایب وزنی) بهینه می‌کند و این مسئله از مهمترین نقاط تمایز تحقیق حاضر با سایر کارهای پیشین است. در حقیقت با انتخاب صورت گرفته برای تابع هدف، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل شد. این مسئله، امکان مقایسه نتایج بدست آمده کار حاضر با بهینه‌سازی دو هدفه ترمو-اقتصادی [۱۱] را فراهم می‌کند. به عبارتی دیگر، ارزش فعلی خالص تابعی از کارایی و هزینه کل رکوپراتور است و بهینه کردن آن، باعث افزایش کارایی (سود ناشی از بکارگیری رکوپراتور) و کاهش هزینه کل می‌شود. همچنین برای بررسی تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی رکوپراتور بر تابع هدف، آنالیز حساسیت انجام گرفت.

۲- مدل‌سازی سیستم

در این قسمت، معادلات لازم برای بدست آوردن ارزش فعلی خالص رکوپراتور میکروتوربین آورده شده است. ارزش فعلی خالص از جمع جبری سود بدست آمده و هزینه کل خرج شده برای رکوپراتور بدست می‌آید؛ بنابراین ابتدا می‌بایست هزینه رکوپراتور تخمین زده شود و سپس سود ناشی از آن را بدست آورد تا مقدار تابع هدف بهینه‌سازی مشخص شود. در شکل ۳، یک رکوپراتور صفحه پره‌دار با آرایش جریان عمود نشان داده شده است.

نرم‌افزاری^۱ ارائه کردند. این نرم‌افزار شامل، رکوپراتورهای پرکاربرد پره صفحه‌ای و سطوح اصلی می‌شود. بهینه‌سازی انجام گرفته چند هدفه بوده، در آن توابع هدف به کمک ضرایب وزنی به یک تابع تبدیل شدند. فشردگی سطوح، افت فشار و هزینه، توابع هدف آن‌ها بودند.

کیوونگ و همکاران، بهینه‌سازی سطوح اولیه رکوپراتور میکروتوربین را به کمک الگوریتم ژنتیک انجام دادند [۷]. در این مقاله، سطوح اولیه عرضی کنگره‌ای و عرضی موجدار مربوط به یک میکروتوربین 100 kW برای رسیدن به فشردگی بیشتر و حجم و وزن کمتر با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه شدند. بهینه‌سازی‌های انجام گرفته در این تحقیق، تک هدفه بودند. نتایج، ممتاز بودن الگوریتم ژنتیک و عملکرد بهتر سطوح اولیه عرضی کنگره‌دار را نشان می‌دهد. زی و همکاران، بهینه‌سازی مبدل صفحه‌پره‌دار با پره دندان-ای در سمت گاز و پره مثلثی در سمت هوا را انجام دادند [۵]. مشخصات هندسی پره مورد مطالعه در هر دو طرف ثابت بود. بهینه‌سازی آن‌ها تک هدفه و با توابع هدف هزینه و حجم، با و بدون قید افت فشار انجام شد. با در نظر گرفتن قید افت فشار به حجمی حدود 30% و قیمتی حدود 15% پایین‌تر رسیدند، اما بدون در نظر گرفتن قید افت فشار به حجمی حدود 49% و قیمتی حدود 16% پایین‌تر رسیدند.

نجفی و همکاران، بهینه‌سازی چند هدفه مبدل صفحه پره‌دار با پره دندانه‌ای را انجام دادند [۸]. توابع هدف آن‌ها هزینه سالیانه و نرخ انتقال حرارت بود. صنایع و حاج عبداللهی، بهینه‌سازی چند هدفه مبدل صفحه پره‌دار با پره دندانه‌ای را انجام دادند [۹]. بهینه‌سازی صورت گرفته چندهدفه بوده، به کمک الگوریتم ژنتیک با رتبه‌بندی نامغلوب^۲ انجام شد. توابع هدف آن‌ها، هزینه سالیانه و کارایی مبدل بود. زارع و همکاران، بهینه‌سازی تک‌هدفه مبدل صفحه پره‌دار با پره نواری را انجام دادند [۱۰]. توابع هدف آن‌ها، سطح انتقال حرارت و افت فشار کلی بود. مقصودی و حنفی‌زاده، بهینه‌سازی چند هدفه رکوپراتور یک میکروتوربین 200 kW را انجام دادند [۱۱]. توابع هدف آنها کارایی رکوپراتور و هزینه کلی بود.

^۱ Compact Heat Exchanger Optimization and Performance Evaluation (CHEOPE)

^۲ Net Present Value

$$UA = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_c \eta_{s,c} A_c} + \frac{1}{h_h \eta_{s,h} A_h} + \frac{a}{A_w k_w} + \frac{R_{f,c}}{A_c} + \frac{R_{f,h}}{A_h} \right]} \quad (۷)$$

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}}, \quad C_{\min} = \min\{\dot{m}_c C_{p,c}, \dot{m}_h C_{p,h}\} \quad (۸)$$

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}, \quad C_{\max} = \max\{\dot{m}_c C_{p,c}, \dot{m}_h C_{p,h}\} \quad (۹)$$

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[\left(\frac{1}{C^*}\right) NTU^{0.22} \{\exp(-C^* NTU^{0.78}) - 1\}\right] \quad (۱۰)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C^*)]}{1 - C^* \exp[-NTU(1 - C^*)]} \quad (۱۱)$$

$$\dot{m}_a C_{p,a} (T_{o,a} - T_0) + \dot{m}_{fuel} LHV = \dot{m}_g C_{p,g} (T_{TIT} - T_0) \quad (۱۲)$$

لازم به ذکر است که روابط (۱۰) و (۱۱) به ترتیب، کارایی رکوپراتورهای جریان عمود و مخالف را ارائه می‌دهند. برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت و فاکتور اصطکاکی (مورد نیاز برای تخمین افت فشار) از روابط ارائه شده توسط منگلیک و برگلز استفاده شده است [۶].

$$f = 9.6243 Re^{-0.7422} \alpha^{-0.1856} \delta^{0.3053} \gamma^{-0.2659} \times [1 + 7.669 \times 10^{-8} Re^{4.429} \alpha^{0.92} \delta^{3.767} \gamma^{0.236}]^{0.1} \quad (۱۳)$$

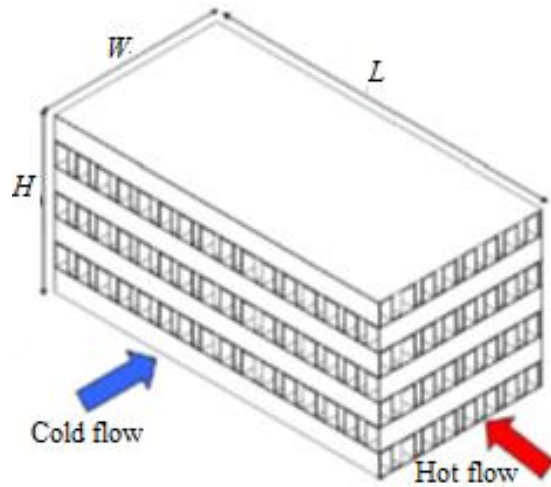
$$j = 0.6522 Re^{-0.5403} \alpha^{-0.1541} \delta^{0.1499} \gamma^{-0.0678} \times [1 + 5.269 \times 10^{-5} Re^{1.34} \alpha^{0.504} \delta^{0.456} \gamma^{-1.055}]^{0.1} \quad (۱۴)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴)، $\gamma = t/s$ ، $\delta = t/x$ ، $\alpha = s/b$ ، (۱۴) و (۱۳) باشند. در این روابط، $0.041 < \gamma < 0.121$ ، $0.0012 < \delta < 0.048$ و $120 < Re < 10^4$ و $0.134 < \alpha < 0.997$ است.

در نهایت برای تخمین هزینه سرمایه‌گذاری و با توجه به نداشتن اطلاعات مناسب، از ضرایب ساده موجود در مرجع [۱۳] استفاده شده است. هزینه سرمایه‌گذاری را به صورت ضریبی از هزینه تجهیزات در نظر می‌گیریم.

$$C_{\text{Capital,p}} = 1.47 C_{\text{purchase}} \quad (۱۵)$$

۲-۱-۲- هزینه کارکرد و تعمیرات و نگهداری
هزینه تعمیرات و نگهداری را معمولاً درصدی از هزینه تجهیزات می‌گیرند که در اینجا ۰/۰۳ فرض شده است [۱۴].



شکل ۳- مبدل صفحه پرده‌دار با جریان عمود [۹]

۲-۱- تخمین هزینه مصرفی رکوپراتور
هزینه رکوپراتور از سه بخش هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری و کارکرد تشکیل می‌شود که در ادامه مقدار هر یک از قسمت‌ها برآورد می‌شود.

۲-۱-۱- هزینه سرمایه‌گذاری

از روش ESDU برای تخمین هزینه تجهیزات استفاده شده است [۱۲]. در این روش، C قیمت مبدل حرارتی بر واحد $Q/\Delta T_m$ است. Q نرخ انتقال حرارت بوده، ΔT_m دمای تصحیح شده است. مقادیر C در جدولی برای انواع مختلف مبدل‌های حرارتی موجود است. مقدار $Q/\Delta T_m$ از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$\frac{Q}{\Delta T_m} = C_{\min} NTU \quad (۱)$$

$$C_{\text{purchase}} = C \left(\frac{Q}{\Delta T_m} \right) \quad (۲)$$

برای بدست آوردن نرخ انتقال حرارت و تعداد واحدهای انتقال از روابط زیر استفاده می‌شود [۱۱].

$$l = 0.5b - t \quad (۳)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_{fin} t}} \quad (۴)$$

$$\eta_{fin} = \frac{\text{tgh}(ml)}{ml} \quad (۵)$$

$$\eta_s = 1 - \frac{A_{fin}}{A} (1 - \eta_{fin}) \quad (۶)$$

$$c_{fuel,A} = 3600m_{fuel}k_{fuel}\tau \quad (22)$$

سود بدست آمده برای مبنای ارزش فعلی سرمایه بصورت رابطه (۲۲) بدست می‌آید:

$$c_{fuel,p} = c_{fuel,A} \left(\frac{1 - (1 + f^*)^n (1 + i)^{-n}}{i - f^*} \right) \quad (23)$$

ارزش فعلی خالص از رابطه (۲۴) بدست می‌آید [۱۶].

$$NPV = c_{fuel,p} - (c_{ope,p} + c_{maintenance,p} + c_{capital,p}) \quad (24)$$

۳- بهینه‌سازی

۳-۱- بهینه‌سازی تک‌هدفه

یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه به دنبال یافتن بهترین مقدار قابل دستیابی از یک تابع هدف تعریف شده بر یک دامنه معین از مقادیر است. صورت ریاضی مسئله بهینه‌سازی تک-هدفه را بصورت روابط (۲۵-۲۹) می‌توان بیان کرد [۱۰]:

$$\text{minimize } f(x) \quad (25)$$

$$g_i(x) \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (26)$$

$$h_j(x) = 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, M \quad (27)$$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (28)$$

$$x_{k,min} \leq x_k \leq x_{k,max} \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

در معادله (۲۵)، $f(x)$ تابع هدف، در معادله (۲۶)، $g_i(x)$ قیود نامساوی، در معادله (۲۷)، $h_j(x)$ قیود مساوی، در معادله (۲۸)، X بردار ستونی از متغیرهای طراحی و در معادله (۲۹)، $x_{k,max}$ و $x_{k,min}$ به ترتیب، کران‌های پایین و بالای متغیرهای طراحی می‌باشند.

همچنین برای در نظرگرفتن اثر نقض قیود در حین فرایند بهینه‌سازی یک مقدار دلخواه بزرگ که به تابع جریمه مشهور است نیز، به تابع هدف افزوده می‌شود؛ بنابراین تابع هدف مسئله بصورت رابطه (۳۰) اصلاح می‌گردد [۱۰]:

$$\text{Minimize } f(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m R_1 (c_j(x))^2 \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، R_1 پارامتر جریمه است که در مقایسه با $f(x)$ ، دارای مقدار نسبتاً بزرگی است و $c_j(x)$ مقدار انحراف از قیود است.

$$c_{Maintenance,p} = 0.03 c_{purchase} \quad (16)$$

هزینه برق مصرفی توسط کمپرسور در سال اول بصورت رابطه (۱۷) بدست می‌آید [۹].

$$c_{ope,A} = (k_{el}\tau \frac{\Delta PV_t}{\eta_{comp}})_c + (k_{el}\tau \frac{\Delta PV_t}{\eta_{comp}})_h \quad (17)$$

افت فشار در مبدل حرارتی فشرده، از رابطه (۱۸) بدست می‌آید [۱۵].

$$\frac{\Delta P}{P_i} = \frac{4G^2 \vartheta_m f L}{2D_h P_i} + \frac{G^2}{2\rho_i P_i} \left(\frac{\rho_i}{\rho_o} - 1 \right) + \frac{G^2}{2\rho_i P_i} (1 - \sigma + K_c) + \frac{G^2}{2\rho_o P_i} (1 - \sigma + K_e) \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، ϑ_m میانگین حجم مخصوص سیال در ورود و خروج است؛ همچنین σ نسبت سطح آزاد جریان به سطح جلویی جریان است.

برای یک تابع هدف مناسب از نظر اقتصادی، می‌بایست با در نظر گرفتن نرخ بهره و نرخ تورم، تمامی هزینه‌ها فوق را یکسان‌سازی کرد تا قابلیت جمع جبری با یکدیگر را داشته باشند. برای این کار، سه گزینه ارزش فعلی، ارزش سالیانه یکنواخت و ارزش آینده وجود دارد که در اینجا همه هزینه‌ها برحسب ارزش فعلی محاسبه شدند؛ بنابراین می‌بایست هزینه سالیانه برق مصرفی و سود بدست آمده از صرفه‌جویی سوخت را به ارزش فعلی تبدیل کرد. با توجه به افزایش سالیانه قیمت سوخت و برق (نرخ تورم)، از مباحث تبدیل هزینه سالیانه (با تصاعد هندسی) به هزینه فعلی در اقتصاد مهندسی داریم [۱۶].

$$c_{ope,p} = c_{ope,A} \left(\frac{1 - (1 + f^*)^n (1 + i)^{-n}}{i - f^*} \right) \quad (19)$$

حال هزینه‌های فوق را با یکدیگر جمع می‌کنیم تا هزینه کلی مصرف شده برای رکوپراتور بدست آید.

$$\text{Cost} = c_{ope,p} + c_{Maintenance,p} + c_{Capital,p} \quad (20)$$

۲-۲- سود ناشی از بکارگیری رکوپراتور

سود بدست آمده از رکوپراتور، ناشی از کاهش مصرف سوخت است. به کمک مقدار حرارت گرفته شده از گاز خروجی و روابط (۲۱) و (۲۲)، می‌توان سود ناشی از کاهش مصرف سوخت در سال اول را بدست آورد [۹].

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q}{LHV} \quad (21)$$

۳-۲- الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات

الگوریتم ژنتیک، یکی از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی است که برگرفته از طبیعت است و ایده اساسی آن، انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌هاست [۱۷]. این الگوریتم با یک جمعیت اولیه که کاملاً تصادفی است و براساس تابع هدف تعیین شده برای مسئله ارزیابی می‌شود، یک جستجوی سرتاسری را آغاز می‌کند و سپس با ترکیب معیارهای انتخاب، همگرایی و جهش از نقاط اکسترمم محلی، جهت یافتن بهترین جواب استفاده می‌کند.

الگوریتم اجتماع ذرات، یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و بر اساس تکرار است. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته جمعی پرندگان و ماهی‌ها است. این الگوریتم همانند سایرین با ایجاد یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه شروع می‌شود، اما برخلاف الگوریتم ژنتیک هیچ عملگر تکاملی نظیر جهش و تزیج ندارد. هر عضو از جمعیت یک ذره نامیده می‌شود و برای آن دو مقدار موقعیت و سرعت، تعریف می‌شود. این ذرات در فضای مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. ذرات با توجه به بهترین جواب محلی و بهترین جواب مطلق مقدار سرعت خود را به روز می‌کنند. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه عام، پیدا شود [۱۸].

۳-۳- تابع هدف، قیود، پارامترهای طراحی و تنظیمات الگوریتم‌ها

در این تحقیق، ارزش فعلی خالص رکوپراتور به کمک الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات بیشینه شده است. گام پره، فاصله بین صفحات (ارتفاع پره)، طول نوار، ارتفاع رکوپراتور، عرض رکوپراتور و طول مسیر جریان رکوپراتور، به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. در جدول ۱ محدوده تغییر پارامترهای طراحی آورده شده است. انتخاب کران بالا و پایین متغیرهای طراحی تا حدودی دلخواه است؛

[۵] اما در این تحقیق، ابعاد کلی رکوپراتور با توجه به محدودیت‌های ابعاد میکروتوربین کپستون^۱ ۲۰۰ kW انتخاب شدند [۱۹]. در جدول ۲، تنظیمات مربوط به الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات [۲۰] و قیود بهینه‌سازی [۲۱] آورده شده است. ماکزیمم تعداد تکرار به عنوان شرط توقف الگوریتم‌ها در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه فشار خروجی سیکل نباید از فشار اتمسفر کمتر شود، این قید لحاظ گردید؛ همچنین قید مربوط به کارایی رکوپراتور به انتخاب طراح و با توجه به این موضوع که رکوپراتور با کارایی پایین از نظر فنی توجیهی برای کاربرد در میکروتوربین ندارد، در نظر گرفته شده است. قیود در نظر گرفته شده بصورت تابع جریمه به تابع هدف اضافه شدند.

۴- مطالعه موردی

بهینه‌سازی صورت گرفته در این مقاله، مربوط به رکوپراتور یک میکروتوربین ۲۰۰ kW است. داده‌های مربوط به میکروتوربین [۱۹ و ۲۲] و داده‌های اقتصادی [۸ و ۲۳]، در جدول ۳ آورده شده است. برخی از داده‌های مربوط به میکروتوربین با استفاده از تحلیل ترمودینامیکی سیکل در نرم‌افزار ترموفلکس بدست آمده‌اند. دمای مرجع برای حل معادله انرژی در محفظه احتراق ۲۹۸/۱۵ درجه کلون در نظر گرفته شده است. سوخت در نظر گرفته شده برای احتراق دیزل مایع است.

ماده انتخاب شده برای رکوپراتور (پره و صفحات) با توجه به دمای گاز داغ ورودی به رکوپراتور انتخاب شده‌اند. در این تحقیق، سوپر فولاد ضدزنگ ۳۴۷ به عنوان ماده رکوپراتور در نظر گرفته شده است [۳]. خواص سیال و جامد بصورت تابعی از دما در نظر گرفته شده‌اند. ضخامت صفحات جدا کننده و ضخامت پره به ترتیب، ۰/۲ mm و ۰/۱ mm انتخاب شده‌اند.

۵- نتایج

۵-۱- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی نتایج مدل، می‌بایست کد نوشته شده برای طراحی ترموهیدرولیکی رکوپراتور صحت‌سنجی شود و برای این منظور، مسئله حل شده در مرجع [۱۵] انتخاب شده

^۱ Capstone

۵-۲- آنالیز حساسیت

در این قسمت، برای بررسی اثر هر یک از پارامترهای هندسی رکوپراتور بر مقدار ارزش فعلی خالص حساسیت‌سنجی (آنالیز حساسیت) انجام شده است. با توجه به اینکه مقدار ارزش فعلی خالص از جمع جبری سود بدست آمده و هزینه مصرفی، بدست می‌آید و اینکه سود بدست آمده تنها تابعی از کارایی رکوپراتور است و هزینه مصرفی تابعی از کارایی و افت فشار است، می‌بایست تاثیر هر یک از پارامترهای هندسی بر کارایی و افت فشار مورد بررسی قرار گیرد تا به نحوه تغییرات تابع هدف مسئله پی برد.

۵-۲-۱- گام پره، ارتفاع پره و طول نوارها

شکل‌های ۴-۶، تغییرات ارزش فعلی خالص را بر حسب گام پره، ارتفاع پره و طول نوارها نشان می‌دهند. همانطور که در شکل‌ها ملاحظه می‌شود، با افزایش هر یک از پارامترهای فوق، ارزش فعلی خالص کم می‌شود. با افزایش مقدار هر یک از متغیرها، افت فشار و کارایی رکوپراتور کاهش می‌یابند. کاهش افت فشار با کاهش هزینه عملکرد و کاهش کارایی با کم کردن هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه کلی مصرف شده برای رکوپراتور را کم می‌کنند. از طرفی دیگر، کاهش کارایی سود بدست آمده از رکوپراتور را هم کاهش می‌دهد و با توجه به اینکه تاثیر کارایی در سود بدست آمده بسیار بیشتر از تاثیر آن بر هزینه مصرفی است و همچنین هزینه کارکرد مربوط به افت فشار در برابر هزینه مصرفی ناچیز و کم است، بنابراین مقدار سود بدست آمده بیشتر از هزینه مصرفی کاهش یافته، در نتیجه مقدار ارزش فعلی خالص با افزایش گام پره، افزایش ارتفاع پره و افزایش طول نوارها کم می‌شود.

جدول ۴- اعتبارسنجی کد نوشته شده برای طراحی مبدل

| کمیت‌ها | مقادیر مرجع | مقادیر کد | خطای نسبی (%) |
|-------------------------|-------------|-----------|---------------|
| کارایی | 0.8381 | 0.8263 | 1.41 |
| افت فشار سیال سرد (kPa) | 8.757 | 8.237 | 5.94 |
| افت فشار سیال گرم (kPa) | 9.05 | 8.503 | 6.04 |

برای بررسی بیشتر تاثیر هر یک از پارامترهای فوق، منحنی خط مناسبی برای هر کدام از نمودارها برآزش شد. شیب هر یک از خطوط برآزش شده، نشان دهنده این است که تغییرات پارامترهای مورد نظر تا چه اندازه، بر کاهش یا

است. نتایج صحت‌سنجی در جدول ۴ آورده شده است که دقت بالا کد نوشته برای طراحی مبدل را تایید می‌کند.

جدول ۱- محدوده تغییر پارامترهای طراحی

| کمیت‌ها | کران پایین | کران بالا |
|------------------------------|--------------------|---------------------|
| گام پره (m) | 10^{-3} | 3×10^{-3} |
| ارتفاع پره (m) | 2×10^{-3} | 10×10^{-3} |
| طول نوار (m) | 3×10^{-3} | 6×10^{-3} |
| طول مسیر جریان رکوپراتور (m) | 0.1 | 1 |
| عرض رکوپراتور (m) | 0.1 | 1 |
| ارتفاع رکوپراتور (m) | 0.1 | 1 |

جدول ۲- قیود و پارامترهای به کار گرفته شده در الگوریتم-های بهینه‌سازی

| پارامترها | مقادیر |
|------------------------|------------------------------------|
| اندازه جمعیت | 50 |
| ماکزیمم تکرار | 200 |
| ضریب اینرسی [۲۰] | 0.7 |
| ضریب یادگیری شخصی [۲۰] | 2 |
| ضریب یادگیری جمعی [۲۰] | 2 |
| قید افت فشار | $P_{o,cycle} \geq 101 \text{ kPa}$ |
| قید عدد رینولدز [۲۱] | $500 \leq Re \leq 1500$ |
| قید کارایی رکوپراتور | $\varepsilon \geq 0.7$ |

جدول ۳- داده‌های ورودی برای مدل

| کمیت‌ها | مقادیر |
|--|---------|
| دمای سیال سرد ورودی به رکوپراتور (K) | 496.95 |
| دمای سیال گرم ورودی به رکوپراتور (K) | 1009.65 |
| فشار سیال سرد ورودی به رکوپراتور (kPa) | 404.1 |
| دبی جرمی سیال سرد (kg/s) | 1.286 |
| دمای ورودی توربین (K) | 1312.25 |
| ارزش حرارتی پایین سوخت (kJ/kg) | 42557 |
| نسبت فشار کمپرسور | 4 |
| افت فشار محفظه احتراق (%) | 4 |
| i (%) | 10 |
| f* (%) | 20 |
| $k_{fuel} (\$/kg)$ | 0.14 |
| n (year) | 10 |
| τ (hour) | 6000 |

۵-۲-۲- طول، عرض و ارتفاع رکوپراتور

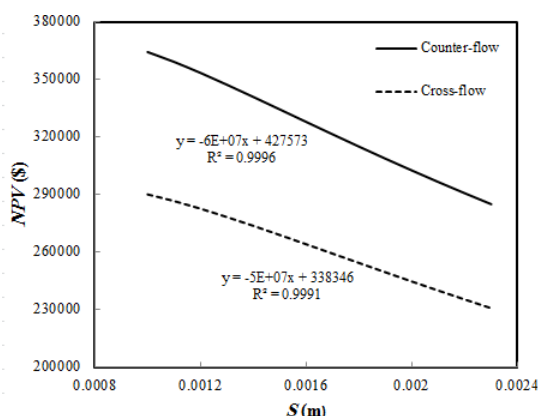
تأثیر طول، عرض و ارتفاع رکوپراتور بر ارزش فعلی خالص به ترتیب در شکل‌های ۷-۹ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش هر یک از پارامترهای فوق، مقدار ارزش فعلی خالص زیاد می‌شود. با افزایش این پارامترها، کارایی رکوپراتور زیاد می‌شود و در نتیجه سود بدست آمده و هزینه سرمایه‌گذاری (برای ساخت رکوپراتور) بیشتر می‌شوند و از آنجا که افزایش سود بدست آمده بیشتر از افزایش هزینه مصرفی است؛ بنابراین ارزش فعلی خالص افزایش می‌یابد، اما تغییر هر یک از پارامترها بر افت فشار تأثیر متفاوتی می‌گذارد (در بعضی موارد سبب کاهش افت فشار می‌شوند و در برخی دیگر آن را افزایش می‌دهند) که با توجه به کم بودن هزینه کارکرد (برای جبران افت فشار)، تأثیر محسوسی بر افزایش یا کاهش هزینه مصرفی و در نتیجه ارزش فعلی خالص نمی‌گذارد.

با توجه به نمودارهای نشان داده شده می‌توان فهمید که مشتق دوم ارزش فعلی خالص نسبت به ابعاد کلی رکوپراتور منفی است (تقعر نمودارها به سمت پایین است). به عبارتی دیگر، با افزایش ابعاد کلی رکوپراتور شیب نمودارها کاهش می‌یابد و این یعنی در ابعاد کوچکتر رکوپراتور، تغییر اندازه رکوپراتور، اثر بیشتری بر افزایش ارزش فعلی خالص دارد. همانطور که از نمودارها پیداست، افزایش ابعاد کلی رکوپراتور، تأثیر مثبتی بر بهبود ارزش فعلی خالص دارد، اما از طرفی دیگر این افزایش طول‌ها، حجم کلی رکوپراتور را افزایش می‌دهند و می‌بایست با توجه به محدودیت ابعادی رکوپراتور (کران بالا و پایین ابعاد رکوپراتور با توجه به ابعاد میکروتوربین تعیین شد) مقدار بیشینه برای آن لحاظ گردد تا متناسب با ابعاد میکروتوربین باشد.

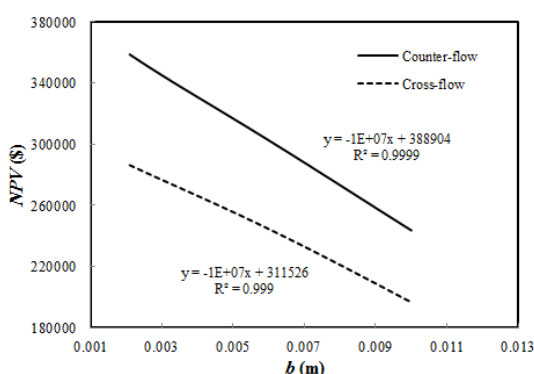
۵-۳- نتایج بهینه‌سازی

در این قسمت، نمودارهای همگرایی مربوط به هر یک از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به همراه نتایج بهینه (مشخصات هندسی و عملکردی رکوپراتور) آورده شده است. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی ۲۰ بار اجرا شده‌اند و مقادیر بهینه بدست آمده، بهترین مقدار بدست آمده برای تمامی اجراها است. کدهای مربوط به الگوریتم‌های بهینه‌ساز و طراحی مبدل، همگی در نرم‌افزار متلب نوشته شدند.

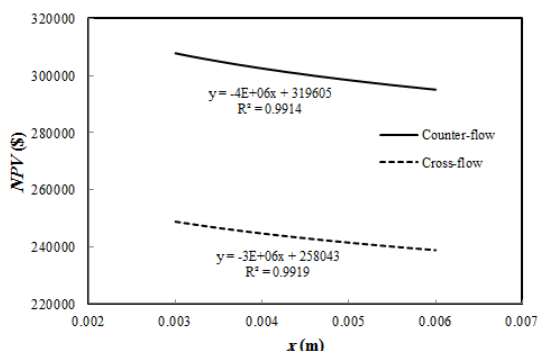
افزایش تابع هدف اثر می‌گذارد. نتایج نشان می‌دهد که گام پره به مراتب مهم‌تر از ارتفاع پره و طول نوارها است و تغییرات آن، مقدار ارزش فعلی خالص را به مراتب بیشتر از دو پارامتر دیگر تغییر می‌دهد. معادله هر یک از خطوط برازش شده و مقدار رگرسیون حاصل از برازش منحنی، در شکل‌ها نشان داده شده است.



شکل ۴- تأثیر گام پره بر ارزش فعلی خالص



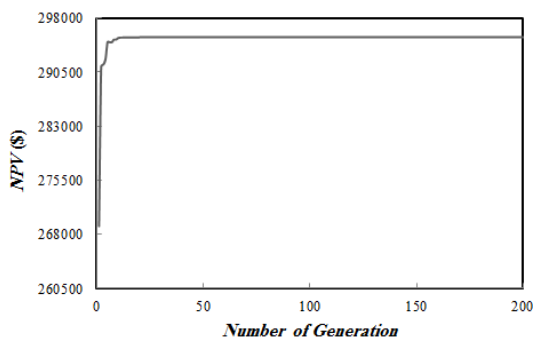
شکل ۵- تأثیر ارتفاع پره بر ارزش فعلی خالص



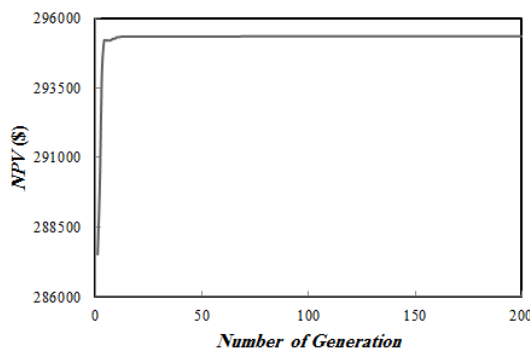
شکل ۶- تأثیر طول نوار بر ارزش فعلی خالص

بیشینه‌سازی مقدار ارزش فعلی خالص رکوپراتور با جریان عمود در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تا تکرار ۹، مقدار ارزش فعلی خالص افزایش قابل توجهی داشته و از این تکرار به بعد تغییراتش کم می‌شود تا اینکه در تکرار ۲۰۰ به مقدار \$ ۲۹۵۳۴۶ برای ارزش فعلی خالص می‌رسد.

جدول ۵، مشخصات هندسی رکوپراتور بهینه شده، توسط الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات را نشان می‌دهد. مقادیر بدست آمده برای پارامترهای مختلف رکوپراتور و سیکل میکروتوربین در جدول ۶ آورده شده است.



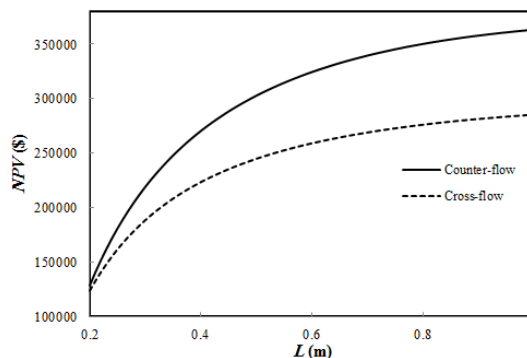
شکل ۱۰- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای رکوپراتور با جریان عمود



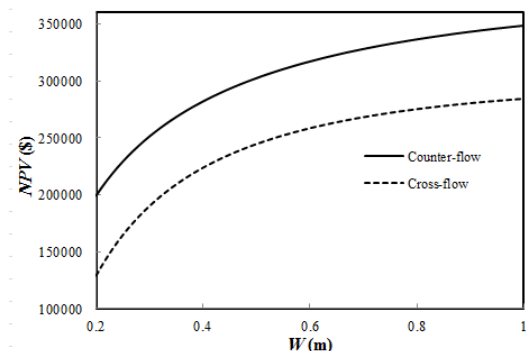
شکل ۱۱- نمودار همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات برای رکوپراتور با جریان عمود

۵-۳-۲- رکوپراتور با جریان مخالف

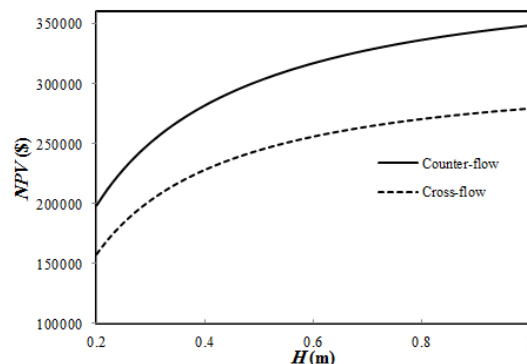
در شکل ۱۲، نمودار همگرایی بیشینه‌سازی ارزش فعلی خالص رکوپراتور جریان مخالف با استفاده از الگوریتم ژنتیک آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد، مقدار تابع هدف تا تکرار ۷ افزایش قابل توجهی داشته، بعد از آن تغییرات تابع



شکل ۷- تاثیر طول مسیر جریان رکوپراتور بر ارزش فعلی خالص



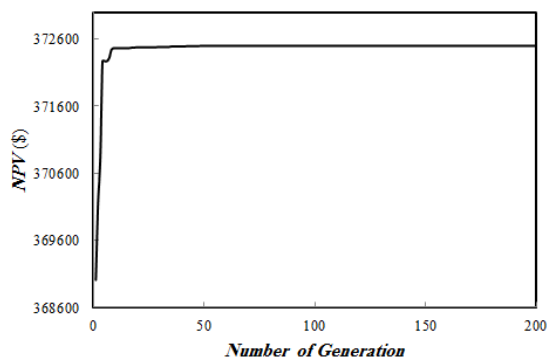
شکل ۸- تاثیر عرض رکوپراتور بر ارزش فعلی خالص



شکل ۹- تاثیر ارتفاع رکوپراتور بر ارزش فعلی خالص

۵-۳-۱- رکوپراتور با جریان عمود

شکل ۱۰، نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای رکوپراتور با آرایش جریان عمود را نشان می‌دهد. الگوریتم تا تکرار ۸، افزایش قابل توجهی در مقدار ارزش فعلی خالص داشته، سرانجام بعد از ۲۰۰ تکرار به مقدار بهینه \$ ۲۹۵۳۲۸/۳ دست یافته است. نمودار همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات برای



شکل ۱۳- نمودار همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات برای رکوپراتور با جریان مخالف

هدف کم شده تا اینکه در تکرار ۲۰۰ به مقدار بیشینه $\$/372489$ برای ارزش فعلی خالص رسید. نمودار همگرایی الگوریتم اجتماع ذرات برای رکوپراتور با آرایش جریان مخالف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. تا تکرار ۸، مقدار ارزش فعلی خالص افزایش قابل توجهی داشته و بعد از آن تغییراتش کوچک شده تا اینکه در تکرار ۲۰۰ به مقدار بهینه $\$/372500$ برای ارزش فعلی خالص رسید.

مشخصات هندسی رکوپراتور بهینه شده و پارامترهای مختلف بدست آمده برای رکوپراتور و سیکل میکروتوربین به ترتیب، در جداول ۷ و ۸ آورده شده‌اند.

جدول ۷- مشخصات هندسی طرح‌های بهینه رکوپراتور با

جریان مخالف

| مقادیر کمیت | طرح الگوریتم ژنتیک | طرح الگوریتم اجتماع ذرات |
|-------------|--------------------|--------------------------|
| S (m) | 0.002284 | 0.002439 |
| b (m) | 0.004637 | 0.004318 |
| x (m) | 0.005033 | 0.005008 |
| L (m) | 0.994428 | 1 |
| W (m) | 0.754404 | 0.889875 |
| H (m) | 0.624533 | 0.54179 |

جدول ۵- مشخصات هندسی طرح‌های بهینه رکوپراتور با

جریان عمود

| مقادیر کمیت | طرح الگوریتم ژنتیک | طرح الگوریتم اجتماع ذرات |
|-------------|--------------------|--------------------------|
| S (m) | 0.002314 | 0.002431 |
| b (m) | 0.004873 | 0.004334 |
| x (m) | 0.004181 | 0.005868 |
| L (m) | 0.933636 | 1 |
| W (m) | 0.984734 | 1 |
| H (m) | 0.503824 | 0.472662 |

جدول ۸- نتایج بهینه برای رکوپراتور با جریان مخالف

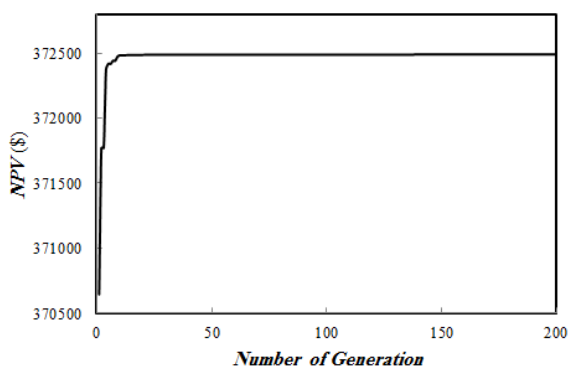
| مقادیر کمیت | طرح الگوریتم ژنتیک | طرح الگوریتم اجتماع ذرات |
|---------------------|--------------------|--------------------------|
| هزینه کلی (\$) | 322819.3 | 322859.2 |
| ارزش فعلی خالص (\$) | 372489.5 | 372500 |
| کارایی | 0.936555 | 0.936619 |
| افت فشار (kPa) | 5.098054 | 4.784283 |
| بازده سیکل | 0.390648 | 0.391693 |

جدول ۶- نتایج بهینه برای رکوپراتور با جریان عمود

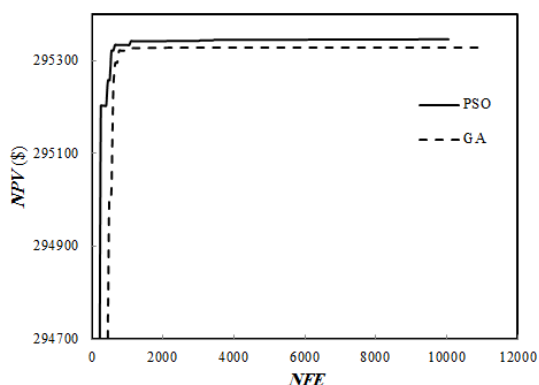
| مقادیر کمیت | طرح الگوریتم ژنتیک | طرح الگوریتم اجتماع ذرات |
|---------------------|--------------------|--------------------------|
| هزینه کلی (\$) | 321173.7 | 321109.5 |
| ارزش فعلی خالص (\$) | 295328.3 | 295346 |
| کارایی | 0.835491 | 0.835431 |
| افت فشار (kPa) | 5.302713 | 4.85614 |
| بازده سیکل | 0.329194 | 0.330592 |

۵-۴- مقایسه نتایج الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات

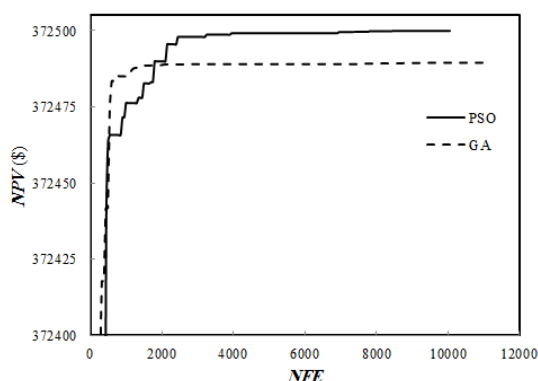
برای مقایسه نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شده، دو معیار مقدار بهینه بدست آمده و حجم محاسبات انجام شده در نظر گرفته شده است. در معیار مقدار بهینه، هر الگوریتمی که مقدار بیشتری را ارائه دهد، بهتر است. برای مقایسه الگوریتم‌ها از نظر حجم محاسبات انجام شده، تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف توسط الگوریتم بهینه‌ساز، معیار قرار گرفته است. به همین منظور، برای مقایسه دو الگوریتم از نمودارهایی استفاده می‌شود که محور عمودی آن ارزش فعلی خالص و محور افقی آن تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف است.



شکل ۱۲- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای رکوپراتور با جریان مخالف



شکل ۱۴- مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات برای رکوپراتور با جریان عمود



شکل ۱۵- مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات برای رکوپراتور با جریان مخالف

آنها با هم نشان می‌دهد که یکی کارایی بیشتری دارد و دیگری هزینه کمتری دارد و از این جهت نسبت به هم برتری ندارند. این بدین معنی است که طرح‌های بدست آمده از بهینه‌سازی تک‌هدفه می‌توانستند، به عنوان یکی از نقاط بهینه پارتو باشند، اما الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه نتوانست به این نقاط دست یابد. طرح‌های بدست آمده از الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات، از نظر معیارهای فنی و اقتصادی ارائه شده در مرجع [۱۱] نسبت به طرح‌های بهینه‌سازی دو هدفه برتری دارند که این موضوع در جداول ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که اعداد موجود در جدول نشان می‌دهد، طرح‌های بدست آمده از الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات، از نظر فنی و اقتصادی (ارزش فعلی خالص و بازده سیکل) نسبت به طرح‌های بدست آمده از بهینه‌سازی دو هدفه بهتر می‌باشند.

شکل ۱۴، مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات را برای رکوپراتور با جریان عمود نشان می‌دهد. با دقت در نمودار نشان داده شده می‌توان فهمید که بعد از کمی تکرار در هر دو الگوریتم، منحنی همگرایی مربوط به الگوریتم اجتماع ذرات بالای منحنی همگرایی الگوریتم ژنتیک قرار می‌گیرد. این بدین معنی است که پس از تعداد یکسانی از ارزیابی تابع هدف توسط دو الگوریتم، مقدار بیشینه بدست آمده توسط الگوریتم اجتماع ذرات بهتر از الگوریتم ژنتیک است. در نهایت هم الگوریتم اجتماع ذرات با تعداد کمتر ارزیابی تابع هدف، به مقدار بهینه بیشتری، نسبت به الگوریتم ژنتیک دست یافت و این بهتر بودن این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. مقایسه الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات برای رکوپراتور جریان مخالف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این نمودار هم، مانند حالت قبل و با توجه به توضیحات گفته شده، بهتر بودن الگوریتم اجتماع ذرات هم از نظر دستیابی به مقدار بیشینه و هم کمتر بودن حجم محاسبات مشخص است.

۵-۵-۵- مقایسه نتایج بهینه‌سازی تک هدفه و دوهدفه (ترمو-اقتصادی)

در این قسمت، نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه با نتایج بهینه‌سازی دو هدفه ترمو-اقتصادی موجود در مرجع [۱۱] مقایسه شده است. در مرجع ذکر شده، کمینه‌سازی هزینه کلی و بیشینه‌سازی کارایی به طور همزمان بوسیله الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام گرفته است. تابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق، تابعی از سود بدست آمده و هزینه کلی است و از آنجا که سود بدست آمده تابعی از کارایی رکوپراتور است، بنابراین تابع هدف کار حاضر، تابعی از کارایی و هزینه کل است. بر این اساس، طرح‌های کار حاضر و مرجع [۱۱] با در نظر گرفتن بازده سیکل و ارزش فعلی خالص از نظر فنی و اقتصادی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۵-۵-۱- رکوپراتور با آرایش جریان عمود

اگر به مقادیر بدست آمده برای کارایی و هزینه کل رکوپراتور در کار حاضر و بهینه‌سازی دوهدفه [۱۱] دقت شود، متوجه می‌شویم که این طرح‌ها هیچ برتری نسبت به هم ندارند و به عبارتی دیگر، بر یکدیگر غلبه ندارند [۱۱] (مقایسه تک تک

۵-۵-۲- رکوپراتور با آرایش جریان مخالف

در رکوپراتور جریان مخالف همانند جریان عمود، با دقت در مقادیر بدست آمده برای کارایی و هزینه کلی رکوپراتور نامغلوب بودن طرح‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه و دو هدفه نسبت به یکدیگر مشخص است. جداول ۱۱ و ۱۲، طرح‌های مذکور را از نظر فنی و اقتصادی مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که نتایج بهینه‌سازی تک‌هدفه از نظر ارزش فعلی خالص و بازده سیکل، بهتر از نتایج بهینه‌سازی دو هدفه است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مبدل صفحه پره‌دار به عنوان رکوپراتور میکروتوربین از نظر ترمو هیدرولیکی مدل‌سازی شده است و سپس هزینه مصرفی و سود بدست آمده از آن برآورد شده‌اند تا مقدار ارزش فعلی خالص که به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است، بیشینه‌سازی شود. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر، بصورت خلاصه در ادامه آمده است:

۱. برای بررسی اثر پارامترهای هندسی بر تابع هدف، آنالیز حساسیت انجام گرفت. نتایج حساسیت-سنجی نشان می‌دهند که با افزایش گام پره، ارتفاع پره و طول نوارها مقدار ارزش فعلی خالص کم می‌شود و با افزایش طول، عرض و ارتفاع رکوپراتور این مقدار افزایش می‌یابد.

۲. مقادیر $\$ 295328/3$ و $\$ 295346$ برای تابع هدف رکوپراتور جریان عمود بوسیله الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات بدست آمده‌اند. در جریان مخالف، این مقادیر $\$ 295328.3$ و $\$ 294591$ می‌باشند.

۳. مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات نشان می‌دهند که الگوریتم اجتماع ذرات با حجم محاسبات کمتر به جواب بهینه بهتری دست یافته است و این موضوع، بهتر بودن این الگوریتم نسبت به ژنتیک را نشان می‌دهد.

۴. نتایج بهینه‌سازی انجام گرفته در این تحقیق، با نتایج بهینه‌سازی ترمو-اقتصادی همین مسئله مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که برای هر دو رکوپراتور جریان عمود و مخالف معیارهای فنی و اقتصادی در نظر گرفته شده در این تحقیق، مقدار بهتری دارند.

جدول ۹- مقایسه نتایج الگوریتم اجتماع ذرات با نتایج

بهینه‌سازی ترمو- اقتصادی برای رکوپراتور با جریان عمود

| طرح | ارزش فعلی خالص (\$) | تفاوت ارزش فعلی خالص (%) | بازده سیکل | تفاوت بازده سیکل (%) |
|-------|---------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| A[11] | 265831 | 9.99 | 0.307 | 7.25 |
| B[11] | 294591 | 0.26 | 0.324 | 2.11 |
| PSO | 295346 | ----- | 0.331 | ----- |

جدول ۱۰- مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک با نتایج بهینه-

سازی ترمو- اقتصادی برای رکوپراتور با جریان عمود

| طرح | ارزش فعلی خالص (\$) | تفاوت ارزش فعلی خالص (%) | بازده سیکل | تفاوت بازده سیکل (%) |
|-------|---------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| A[11] | 265831 | 9.99 | 0.307 | 6.69 |
| B[11] | 294591 | 0.25 | 0.324 | 1.52 |
| GA | 295328.3 | ----- | 0.329 | ----- |

جدول ۱۱- مقایسه نتایج الگوریتم اجتماع ذرات با نتایج

بهینه‌سازی ترمو- اقتصادی برای رکوپراتور با جریان مخالف

| طرح | ارزش فعلی خالص (\$) | تفاوت ارزش فعلی خالص (%) | بازده سیکل | تفاوت بازده سیکل (%) |
|-------|---------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| C[11] | 329512.7 | 11.54 | 0.3459 | 11.69 |
| D[11] | 361852.5 | 2.86 | 0.3705 | 5.41 |
| PSO | 372500 | ----- | 0.3917 | ----- |

جدول ۱۲- مقایسه نتایج الگوریتم ژنتیک با نتایج بهینه-

سازی ترمو- اقتصادی برای رکوپراتور با جریان مخالف

| طرح | ارزش فعلی خالص (\$) | تفاوت ارزش فعلی خالص (%) | بازده سیکل | تفاوت بازده سیکل (%) |
|-------|---------------------|--------------------------|------------|----------------------|
| C[11] | 329512.7 | 11.54 | 0.3459 | 11.44 |
| D[11] | 361852.5 | 2.86 | 0.3705 | 5.15 |
| GA | 372489.5 | ----- | 0.3906 | ----- |

۷- فهرست علائم

| | |
|---------------------------------------|-------|
| مساحت دیواره (m^2) | A_w |
| سطح انتقال حرارت هر پره (m^2) | A_f |
| سطح کلی انتقال حرارت (m^2) | A |
| فاصله بین صفحات (m) | b |
| ظرفیت گرمایی در فشار ثابت (J/kgK) | C_p |

| | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--|-------------------|
| ضخامت پره (m) | t | نسبت ظرفیت گرمایی | c^* |
| ضریب انتقال حرارت کلی (W/K) | UA | ضریب محاسبه قیمت تجهیزات (\$K/W) | C |
| دبی حجمی (m^3/s) | V_t | سود ناشی از بازیافت گرما (\$) | c_{fuel} |
| عرض رکوپراتور (m) | W | هزینه کلی خرج شده (\$) | Cost |
| طول نوارها در پره نواری (m) | x | هزینه کارکرد (\$) | c_{ope} |
| | علائم یونانی | هزینه تجهیزات (\$) | $c_{purchase}$ |
| دمای تصحیح شده (K) | ΔT_m | هزینه سرمایه‌گذاری (\$) | $c_{Capital}$ |
| افت فشار (kPa) | ΔP | هزینه تعمیرات و نگهداری (\$) | $c_{Maintenance}$ |
| کارایی مبدل | ε | قطر هیدرولیکی (m) | D_h |
| راندمان یک پره | η_{fin} | ضریب اصطکاک | f |
| راندمان مجموعه پره‌ها | η_s | نرخ تورم (%) | f^* |
| راندمان کمپرسور | η_{comp} | شار جرمی (kg/m^2s) | G |
| حجم مخصوص میانگین (m^3/kg) | ϑ_m | ارتفاع رکوپراتور (m) | H |
| چگالی (kg/m^3) | ρ | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/m^2K) | h |
| نسبت سطح جلو به سطح آزاد | σ | نرخ بهره (%) | i |
| تعداد ساعات کار دستگاه در سال (hour) | τ | ضریب کولبرن | j |
| | زیرنویس‌ها | ضریب هدایت حرارتی (W/mK) | K |
| هوا | a | ضریب افت فشار در خروج | K_e |
| ارزش پروژه در سال اول | A | ضریب افت فشار در ورود | K_c |
| سرد | c | قیمت برق (\$MW/h) | k_{el} |
| گاز | g | قیمت سوخت (\$/kg) | k_f |
| گرم | h | طول مسیر جریان رکوپراتور (m) | L |
| ورودی | i | ارزش حرارتی پایین سوخت (kJ/kg) | LHV |
| خروجی | o | دبی جرمی (kg/s) | \dot{m} |
| ارزش فعلی پروژه | P | عمر پروژه (year) | n |
| دیواره | w | ارزش فعلی خالص (\$) | NPV |
| | | تعداد واحدهای انتقال | NTU |
| | | فشار (kPa) | P |
| | | فشار خروجی سیکل (kPa) | $P_{o,cycle}$ |
| | | عدد پرنتل | Pr |
| | | گرمای بازیاب شده (W) | Q |
| | | عدد رینولدز | Re |
| | | ضریب رسوب (m^2K/W) | R_f |
| | | گام پره (m) | s |
| | | دمای (K) | T |
| | | دمای ورودی به توربین (K) | T_{TIT} |
| | | دمای مرجع آنتالپی (K) | T_0 |

۸- مراجع

- [1] Shah RK (2005) Compact heat exchangers for microturbines. In: Proceedings of the 5th conference on enhanced, compact and ultra-compact heat exchangers: science, engineering and technology. Hoboken, NJ, USA.
- [2] Hanafizadeh P, Parhizgar T, Nouri Gheimasi A (2015) Analysis of micro-recuperators in small-sized gas turbines-manufacturing potential of Iran. Energy Equip Sys 3(1): 1-12.
- [3] Omatete OO, Maziasz PJ, Pint BA, Stinton DP (2000) Assessment of recuperator materials for microturbines. Oak Ridge National Laboratory, Metals and Ceramics Division. Report No.: ORNL

- Package for Engineers. Energy Efficiency Best Practice Programme, UK.
- [13] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ (1996) Thermal design and optimization. John Wiley & Sons, New York.
- [14] Salama A, Khalil A (2010) Optimization of plate fin heat exchangers used in natural gas liquefaction. in The 10th International Congress of Fluid Dynamics. Ain Soukhna, Red Sea, Egypt.
- [15] Shah RK, Sekulic DP (2003) Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons, New York.
- [۱۶] اسکونژاد م م (۱۳۷۸) اقتصاد مهندسی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- [17] Genetic algorithm (2015) <http://www.fa.wikipedia.org>.
- [18] Particle swarm optimization (2015) <http://www.icasite.info>.
- [19] Capstone turbine (2015) <http://www.capstoneturbine.com/products/c200>.
- [20] Lee W, Chen Y, Wu T (2009) Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm. Appl Energy 86(9): 1589–1595.
- [۲۱] اکتسابی م ر (ترجمه) (۱۳۷۱) مبدل‌های حرارتی فشرده. شرکت رادیاتور ایران، تهران، ایران.
- [۲۲] شرفی م، بروشکی م، قلی‌زاده الف (۱۳۸۹) بهینه‌سازی سیکل میکروتوربین گازی با کمک الگوریتم ژنتیک. هجدهمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران. دانشگاه صنعتی شریف.
- [23] Diesel price (2015) <http://www.globalpetrolprices.com> /TM-2000/304. Contract No.: DE-AC05-00OR22725.
- [4] Traverso A, Massardo AF (2005) Optimal design of compact recuperators for microturbine application. Appl Therm Eng 25(14): 2054-2071.
- [5] Xie GN, Sunden B, Wang QW, Sundén B, Wang QW (2008) Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm. Appl Therm Eng 28(8): 895-906.
- [6] Manglik RM, Bergles AE (1995) Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger. Exp Therm Fluid Sci 10(2): 171-180.
- [7] Qiuwang W, Hongxia L, Gongnan X, Min Z, Laiqin L, ZhenPing F (2006) Genetic algorithm optimization for primary surfaces recuperator of microturbine. J Eng Gas Turbines Power 129(2) : 436-442.
- [8] Najafi H, Najafi B, Hoseinpoori P (2011) Energy and cost optimization of a plate and fin heat exchanger using genetic algorithm. Appl Therm Eng 31(10): 1839-1847.
- [9] Sanaye S, Hajabdollahi H (2010) Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm. Appl Energy 87(6): 1893-1902.
- [۱۰] زارع ج، بعنونی س، قنبرزاده الف (۱۳۹۱) طراحی بهینه مبدل گرمایی صفحه‌ای پره‌دار با روش الگوریتم بهینه‌سازی زنبور عسل. ماهنامه مکانیک مدرس ۲۹-۲۲: ۱۲(۵).
- [۱۱] مقصودی پ، حنفی‌زاده پ (۱۳۹۵) بهینه‌سازی چند هدفه رکوپراتور میکروتوربین گازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک. ماهنامه مکانیک مدرس ۱۲۰-۱۱۱: ۱۶(۱).
- [12] Energy Efficiency Best Practice programme (2000) Compact Heat Exchangers: a Training