

ماهنامه علمى پژوهشى

ی مکانیک مدرس



بهینهسازی چند هدفه رکوپراتور میکروتوربین با استفاده از الگوریتم ژنتیک

پیمان مقصودی¹، پدرام حنفیزاده^{2*}

1 - کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران، تهران
 2 - استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، hanafizadeh@ut.ac.ir ،515-14395

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله رکوپراتور یک میکروتوربین kW 200 با در نظر گرفتن هزینه و کارایی به عنوان پارامترهای کلیدی، با الگوریتم ژنتیک چند هدفه	مقاله پژوهشی کامل
بهینهسازی شده است. از روش NTU-£ برای تخمین کارایی و افت فشار استفاده شده است. هزینه کلی رکوپراتور شامل هزینه سرمایهگذاری،	دريافت: 20 مهر 1394 منه 20 آبار 1394
هزینه کارکرد و هزینه تعمیرات و نگهداری میباشد. مبدل حرارتی صفحه پرهدار با پره نواری و آرایش جریان متقاطع و مخالف برای بهینهسازی	پدیرس:29 ابان 294 ا ارائه در سایت: 28 آذر 1394
- انتخاب شده است. گام پره، ارتفاع پره، طول نوار، طول مسير جريان سرد، طول مسير بدون جريان و طول مسير جريان گرم به عنوان شش	کلید واژگان:
پارامتر طراحی در نظر گرفته شدهاند. الگوریتم ژنتیک با مرتبسازی نامغلوب2 برای بیشینه کردن کارایی رکوپراتور و کمینه کردن هزینه کلی آن	رکوپراتور
به عنوان توابع هدف استفاده شده است. جوابهای بهینهسازی به صورت مجموعهای از جوابهای بهینه به نام منحنی بهینه پارتو ارائه شدند.	ميكروتوربين
نتایج، تضاد دو تابع هدف را به خوبی نشان میدهند، به عبارتی دیگر هر تغییر در پارامترهای هندسی که کارایی را افزایش دهد هزینه را هم	الگوريتم ژنتيک
افزایش میدهد و بالعکس. در انتها طرحهای بهینه بدست آمده بر اساس مفهوم مرتبسازی نامغلوب با یکدیگر مقایسه شدند و طرحهای بهینه	صفحه پرهدار
نهایی بدست آمدند.	پارتو

Multi-objective optimization for recuperator of microturbine using genetic algorithm

Peyman Maghsoudi, Pedram Hanafizadeh^{*}

Sils

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran * P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran hanafizadeh@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT **Original Research Paper** In this paper, multi objective genetic algorithm is applied to optimize one type of recuperator in a 200 Received 12 October 2015 kW microturbine by considering two key parameters such as recuperator efficiency and cost. E-NTU Accepted 20 November 2015 method is selected for the recuperator efficiency and pressure drop calculation. The recuperator total Available Online 19 December 2015 cost consists of capital cost, operational cost and maintenance cost. A plate-fin heat exchanger with offset strip fin for counter and cross flow arrangements is chosen for optimization. Fin pitch, fin height, Keywords: fin offset length, cold stream flow length, non-flow stream length and hot stream flow length are Recuperator considered as six design parameters. NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) is Microturbine Genetic Algorithm conducted to maximize recuperator efficiency and minimize its total cost. Results of the optimization Plate-Fin are presented as a set of designs, called 'Pareto-optimal solutions'. The results reveal the conflict Pareto between the two objective functions. It can be concluded that any change in the geometry of the recuperator increasing the efficiency also increases the total cost and vice versa. Finally, the optimal designs are compared together based on non-dominated sorting concept and the final optimal designs are obtained.

کردن هوای ورودی به محفظه احتراق و کاهش مصرف سوخت، بازده سیکل	1 - مقدمه
را تا %30٪ یا بیشتر افزایش میدهد. از طرفی دیگر هزینه رکوپراتور 25 تا	با توجه به بازار تولید انرژی پراکنده، یکی از مقرون به صرفهترین راهحلها
35 درصد هزینه کل سیکل میباشد [1]، بنابراین افزودن ر کوپراتور به سیکل	برای تولید برق استفاده از سیستمهای توربین گاز در مقیاس کوچک است که
میکروتوربین گازی میبایست از نظر فنی و اقتصادی بهینه گردد تا بکار گیری	با عنوانهای میکروتوربین (kW 5 تا 200 kW) و مینیتوربین (200 kW
آن قابل توجیه باشد. در شکل 1 سیکل میکروتوربین گازی به همراه	تا 500 kW نامگذاری شدهاند [1]. سیکل ساده میکروتوربین گازی از
ر کوپراتور نشان داده شده است.	کمپرسور، محفظه احتراق و توربین تشکیل میشود که این اجزا برای تولید
ر کوپراتورها مورد استفاده در توربینهای گازی کوچک از دیدگاه روش	توان در مقیاس کوچک در کنار هم کار میکنند [2]. بازده این سیکل ساده
ساخت به سه دسته کلی تقسیمبندی میشوند: رکوپراتورهای	حدود %20 یا کمتر میباشد. استفاده از بازیاب حرارتی به منظور پیشگرم

Please cite this article using: P. Maghsoudi, P. Hanafizadeh, Multi-objective optimization for recuperator of microturbine using genetic algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 111-120, 2016 (in Persian)

لولهای¹، یره صفحهای²و رکویراتورهای با سطح اصلی³ **[3]**. رکویراتورهای لولهای دارای حجم و وزن بالایی (و در نتیجه قیمت بالاتری) نسبت به انواع رکوپراتورهای امروزی میباشند و در میکروتوربینها کاربردی ندارند. ر کوپراتورهای پره صفحهای و سطوح اصلی از انواع ر کوپراتورهای پر کاربرد در میکروتوربینها میباشند [4]. رکویراتورهای بره صفحهای بر اساس بره استفاده شده شامل انواع مختلفی میباشند. پرههای ساده و مستقیم(مثلثی و مستطیلی)، ساده و موجی(موج در جهت جریان)، پرههای منقطع(نواری و کرکرهای)، سوراخدار و سوزنی، انواع پرههای موجود در رکوپراتورهای صفحه يرەدار مىباشند[5].

پره نواری بطور گسترده در مبدلهای حرارتی صفحه پرداره با عملکرد بالا استفاده می شود. این نوع پره سطوح منقطع را شامل می شود، که ممکن است بصورت مجموعهای از پرههای ساده در نظر گرفته شوند که در جهت عمود بر جریان در فواصل منظم قطع می شوند، هر بخش بصورت جانبی با نصف فاصله پره جابهجا می شود. طول نوارها بطور معمول بین **3mm** تا است و عدد رینولدز بر اساس طول نوار، بسیار کوچک میباشد که رژیم جریان آرام را برای همیشه ایجاد میکند. لایه مرزی جریان آرام بر طول کوتاه نوار رشد میکند و سیس در منطقه بعد از آن، در میان نوارهای پیدرپی پراکنده میشود. انقطاع سطوح، با دو مکانیزم، انتقال حرارت را افزایش میدهد. اول اینکه، با انقطاعهای پیدرپی از رشد پیوسته لایه مرزی جلوگیری به عمل میآورد. لایه مرزی نازک، مقاومت گرمایی کمتری را نسبت به انواع یره پیوسته، ارائه می دهد. بالاتر از یک عدد رینولدز بحرانی، سطوح منقطع یک مکانیزم اضافی دیگری برای افزایش انتقال حرارت ارائه میدهند. نوسانات در میدان جریان به شکل گردابهها از لبه پشتی خطوط پرههای منقطع جاری میشود، که انتقال حرارت محلی را با آوردن پیوسته سیال تازه به سطوح انتقال حرارت، افزایش میدهد. از طرفی دیگر افزایش سطح انتقال حرارت، میزان انتقال گرما را افزایش میدهد و عملکرد حرارتی این گونه پرهها را افزایش میدهد [6].

در سالهای اخیر کارهای مختلفی بر روی مشخصات ترموهیدرولیکی رکوپراتورهای صفحه پرهدار و بهینهسازی آنها انجام شد. منگلیک و برگلز روابطی را برای ضریب کولبرن و فاکتور اصطکاکی پرههای نواری ارائه کردند [7]. 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 میباشد. تراورسا و ماساردو هم روش جدیدی را برای بهینهسازی رکوپراتورهای مورد استفاده در میکروتوربینها از نقطهنظر فنی و اقتصادی ارائه کردند [4]. روش ارائه شده در قالب نرمافزاری به نام CHOPE⁴ میباشد و شامل دو نوع از مبدلها (رکوپراتورهای پره صفحهای و سطوح اصلی) که بیشترین کاربرد را در میکروتوربین دارند، می شود. بهینه-سازی انجام گرفته چند هدفه بوده و در آن توابع هدف به کمک ضرایب وزنی به یک تابع تبدیل شدند. فشردگی سطوح، افت فشار و هزینه، توابع هدف آن ها بودند. کیوونگ و همکاران بهینهسازی سطوح اولیه رکوپراتور میکروتوربین را به کمک الگوریتم ژنتیک انجام دادند [8] . در این مقاله دو نوع از سطوح اولیه (سطوح اولیه عرضی کنگرهای و سطوح اولیه 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 بهینه سازی مبدل صفحهپرهدار با پره دندانهای در سمت گاز و پره مثلثی در سمت هوا را انجام دادند [9]. مشخصات هندسی پره مورد مطالعه در هر دو طرف مشخص 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 [10]. توابع هدف آنها هزینه سالیانه و نرخ انتقال حرارت بود. صنایع و حاج عبداللهی بهینهسازی چند هدفه مبدل صفحه پره-دار با پره دندانهای را انجام دادند [11]. بهینهسازی صورت گرفته چندهدفه بوده و به کمک الگوریتم ژنتیک با رتبهبندی نامغلوب2 انجام شد. توابع هدف آنها هزینه سالیانه و کارایی مبدل بود. زارع و همکاران بیهنهسازی تکهدفه مبدل صفحه پرهدار با پره نواری را انجام دادند [12]. توابع هدف آنها سطح انتقال حرارت و افت فشار کلی بود.

در مقاله حاضر رکوپراتور یک میکروتوربین **200 kW** از نظر فنی و اقتصادی بهینهسازی شده است. رکوپراتور انتخاب شده یک مبدل صفحه پرهدار با پره نواری به همراه دو آرایش جریان متقاطع و مخالف میباشد. کارایی رکوپراتور و هزینه آن به عنوان توابع هدف بهینهسازی در نظر گرفته شده است که به کمک الگوریتم ژنتیک با رتبهبندی نامغلوب2 بهینه شدهاند. در کارهای پیشین ذکر شده، کارایی رکوپراتور به عنوان تابع هدف برای بهینهسازی رکوپراتور موجود در میکروتوربین انتخاب نشده است و در این کارها مقدار کارایی ثابت فرض شد. اما در این تحقیق کارایی رکوپراتور به عنوان یکی از توابع هدف بهینهسازی در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه رکوپراتور یکی از اجزای سیکل میکروتوربین میباشد و کارایی آن به عنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده است، برای طراحی بهینه مبدل می بایست معادله انرژی در محفظه احتراق حل شود. استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای بهینهسازی رکوپراتور میکروتوربین از دیگر تفاوتهای کار حاضر با سایر کارها میباشد. بهنیهسازی همزمان هزینه و کارایی از موارد دیگری هست که در کارهای پیشین مربوط به بهینهسازی رکوپراتور میکروتوربین، مشاهده نشده است.

2- مدلسازي حرارتي سيالاتي

در این بخش مدلسازی حرارتی و سیالاتی به همراه فرمولهای اصلی برای



Fig. 1 Schematic of recuperated microturbine cycle **شکل 1** طرح کلی از سیکل میکروتوربین به همراه رکویراتور

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

1- Tubular

2- Plate-fin

3- Primary surface

4- Compact heat exchanger optimization and performance evaluation

طراحی مبدل آورده شده است.

در شکلهای 2 و 3 مبدل صفحه پرهدار با جریان متقاطع و هندسه پره نواری نشان داده شده است.

با توجه به اینکه کارایی رکوپراتور یکی از توابع هدف مسئله بهینهسازی است، برای طراحی مبدل میبایست مسئله دستهبندی¹ حل شود. برای حل مسئله دستهبندی دبیهایجرمی، فشارهای ورودی و دماهای ورودی باید معلوم باشند. از طرفی چون رکوپراتور یک جزء از میکروتوربین میباشد تغییر هر یک از پارامترهای رکوپراتور روی سیکل اثر میگذارد و میبایست لحاظ گردند. برای بررسی این موضوع در ادامه چند نکته ضروری را ذکر میکنیم.

- الف) با تغییر کارایی رکوپراتور، دبی سوخت مصرفی تغییر میکند. بنابراین با محاسبه کارایی رکوپراتور، دبی جرمی سوخت در هر مرحله میبایست اصلاح شود که این مسئله با نوشتن معادله انرژی در محفظه احتراق انجام شده است.
- ب) تغییر فشار در قسمت سیال سرد رکوپراتور، باعث تغییر فشار ورودی سیال گرم رکوپراتور میشود که با نوشتن افت فشار اجزا مختلف سیکل میبایست اصلاح شود.
- مشخصات هندسی پره (سطح انتقال حرارت، سطح جریان و غیره) در مرجع [5] آورده شده است که در اینجا از آوردن آنها خودداری شده است.



Fig. 2 Plate-fin heat exchanger with cross-flow arrangement [11] شکل **2** مبدل صفحه پرهدار با جریان متقاطع [11]



ابتدا به کمک دبی جرمی، شار جرمی و عدد رینولدز از روابط (1) و (2) بدست می آید.

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{\min}} \tag{1}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{GD_{\rm h}}{\mu} \tag{2}$$

برای ارزیابی ضریب کولبرن و فاکتور اصطکاکی پرههای نواری روابط زیادی موجود است. در این تحقیق از معادلات (3) و (4) که توسط منگلیک و برگلز ارائه شدهاند، استفاده شده است. فاکتور اصطکاک و ضریب انتقال

$$= 9.6243 \operatorname{Re}^{-0.7422} \alpha^{-0.1856} \delta^{0.3053} \gamma^{-0.2659} \times$$

$$j = 0.6522 \operatorname{Re}^{-0.5403} \alpha^{-0.1541} \delta^{0.1499} \gamma^{-0.0678} \times$$

[1 + 5.269 + 10⁻⁵Re^{1.34}
$$\alpha^{0.304}\delta^{0.436}\gamma^{-1.035}$$
]^{0.1} (4,
د. روابط (3) و $\gamma = t/s$, $\delta = t/x$, $\alpha = s/b$ (4) (3) د.

0.134 <، 0.0.012 < δ < 0.048 ، 0.041 < γ < 0.121 این روابط 120 < Re < 10⁴ و α < 0.997 میباشد.

روابط ارائه شده برای ضریب کولبرن و فاکتور اصطکاک، دقت %20 با نتایج آزمایشی در رژیمهای جریان آرام، گذرا و آشفته دارند. ضریب انتقال حرارت جابهجایی از معادلات (5) و (6) بدست میآید.

$$St = \frac{j}{z^2}$$
(5)

$$h = GCp\mathbf{St} \tag{6}$$

با مشخص شدن ضریب انتقال حرارت جابهجایی راندمان پرهها و ضریب انتقال حرارت کلی را می توان بدست آورد.

$$L = \mathbf{0.5}b - t \tag{7}$$

$$m = \sqrt{\frac{2h}{k_{\text{fluid}}t}} \tag{8}$$

$$\eta_{\rm fin} = \frac{\rm tgn(mL)}{mL} \tag{9}$$

$$\eta_{\rm s} = \mathbf{1} - \frac{A_{\rm fin}}{A} (\mathbf{1} - \eta_{\rm fin}) \tag{10}$$

$$UA = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_{c}\eta_{s,c}A_{c}} + \frac{1}{h_{h}\eta_{s,h}A_{h}} + \frac{a}{A_{w}k_{w}} + \frac{R_{f,c}}{A_{c}} + \frac{R_{f,h}}{A_{h}}\right]}$$
(11)

$$\mathbf{NTU} = \frac{UA}{c_{\min}} \quad , \quad c_{\min} = \min\{\dot{m}_{c}Cp_{c}, \dot{m}_{h}Cp_{h}\}$$
(12)

$$\mathbf{c}^* = \frac{c_{\min}}{c_{\max}} \quad , \quad c_{\max} = \max\{\dot{m}_c C p_c, \dot{m}_h C p_h\} \quad (13)$$

$$\varepsilon = \mathbf{1} - \exp\left[\left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{c}^*}\right) \mathbf{NTU}^{0.22} \{\exp(-\mathbf{c}^* \mathbf{NTU}^{0.78}) - \mathbf{1}\}\right] \qquad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c^*)]}{1 - c^* \exp[-NTU(1 - c^*)]}$$
(15)

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c^*)]}{1 - c^* \exp[-NTU(1 - c^*)]}$$
(15)

$$\varepsilon = m_{w} \sum_{a} \sum_{b} \sum_{a} \sum_{b} \sum_{c} \sum_{b} \sum_{c} \sum_{b} \sum_{c} \sum_{b} \sum_{c} \sum_{b} \sum_{c} \sum_{c} \sum_{b} \sum_{c} \sum_$$

Fig. 3 Definition of geometrical parameters for offset strip fin [11] شکل **3** مشخصات هندسی پره نواری[11]

1- Rating problem

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

$$\frac{\Delta P}{P_{\rm i}} = \frac{\mathbf{4}G^2 \vartheta_m f L_c}{\mathbf{2}D_{\rm h}P_{\rm i}} + \frac{G^2}{\mathbf{2}\rho_{\rm i}P_{\rm i}} \left(\frac{\rho_{\rm i}}{\rho_{\rm o}} - \mathbf{1}\right) + \frac{G^2}{\mathbf{2}\rho_{\rm i}P_{\rm i}} \left(\mathbf{1} - \sigma + K_{\rm e}\right) + K_c \left(\frac{G^2}{\mathbf{2}\rho_{\rm o}P_{\rm i}} - \sigma + K_{\rm e}\right)$$
(17)

در رابطه (17) ϑ_m میانگین حجم مخصوص سیال در ورود و خروج میباشد. همچنین σ نسبت سطح آزاد جریان به سطح جلویی جریان میباشد.

3- تخمين قيمت و ارائه معيار اقتصادي براي مقايسه طرحها

یک مبدل حرارتی از لحاظ اقتصادی هزینههای مختلفی را شامل می شود. هزینه سرمایه گذاری (هزینه ساخت مبدل)، هزینه تعمیرات و نگهداری و هزینه کارکرد (هزینه برق مصرفی توسط کمپرسور برای جبران افت فشار) از مهم ترین هزینه های موجود می باشند.

از روش ESDU برای تخمین هزینه تجهیزات استفاده شده است [14]. در این روش C قیمت مبدل حرارتی بر واحد $Q/\Delta T_m$ میباشد. Q نرخ انتقال حرارت بوده و ΔT_m دمای تصحیح شده میباشد. مقادیر C در جدولی برای انواع مختلف مبدلهای حرارتی موجود است. با توجه به معلوم بودن تعداد واحدهای انتقال و مشخص بودن سیال حداقل، مقدار $Q/\Delta T_m$ از رابطه (18) و (19) بدست میآید.

$$\frac{Q}{\Delta T_{\rm m}} = c_{\rm min} \mathsf{NTU} \tag{18}$$

$$c_{\text{purchase}} = C(\frac{Q}{\Delta T_{\text{m}}})$$
(19)

با توجه به نداشتن اطلاعات مناسب برای تخمین هزینه سرمایه گذاری، از ضرایب ساده موجود در مرجع [15] استفاده شده است. هزینه سرمایه گذاری را به صورت ضریبی از هزینه تجهیزات در نظر می گیریم.

$$C_{\text{Capital,p}} = 1.47 c_{\text{purchase}}$$
(20)

هزینه تعمیرات و نگهداری را معمولا درصدی از هزینه تجهیزات می گیرند که در اینجا 0.03 فرض شده است.

$$c_{\text{Maintenance,p}} = 0.03 c_{\text{purchase}}$$

هزینه برق مصرفی توسط کمپرسور در سال اول بصورت زیر بدست می آید [11].

$$c_{\text{ope},A} = (k_{el}\tau \frac{\Delta P V_{t}}{\eta_{\text{comp}}})_{c} + (k_{el}\tau \frac{\Delta P V_{t}}{\eta_{\text{comp}}})_{h}$$
(22)

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 گزینهی ارزش فعلی، ارزش سالیانه یکنواخت و ارزش آینده وجود دارد که در اینجا همه هزینهها بر حسب ارزش فعلی محاسبه شدند. بنابراین میبایست هزینه سالیانه برق مصرفی و سود بدست آمده از صرفهجویی سوخت را به ارزش فعلی تبدیل

به کمک مقدار حرارت گرفته شده از گاز خروجی و روابط (25) و (26) میتوان سود ناشی از کاهش مصرف سوخت در سال اول را بدست آورد [11].

$$\dot{m}_{\rm fuel} = \frac{Q}{1 \, \text{JW}} \tag{25}$$

 $c_{\mathrm{f},A} = \mathbf{3600} m_{\mathrm{fuel}} k_{\mathrm{fuel}} \tau \tag{26}$

سود بدست آمده برای مبنای ارزش فعلی سرمایه بصورت رابطه (27) بدست میآید:

$$c_{f,p} = c_{f,A} \left(\frac{1 - (1 + f^*)^n (1 + i)^{-n}}{i - f^*} \right)$$
(27)

ارزش فعلی سرمایه¹ که برای مقایسه طرحهای بهینه در قسمت نتایج استفاده میشود از جمع جبری هزینههای خرج شده در زمان حاضر با سود بدست آمده در زمان حاضر بدست میآید [16].

 $NPV = c_{f,p} - (c_{ope,p} + c_{Maintenance,p} + c_{Capital,p})$ (28)

4- بهينهسازي

4-1- بهینهسازی چند هدفه

صورت استاندارد مسائل بهینهسازی چند هدفه را میتوان بصورت زیر بیان کرد [17]:

یافتن بردار طراحی
$$X = [x_1, x_2, ..., x_n]^T$$
 به نحوی که بردار
هدف $[f_1(x), f_2(x), ..., f_m(x)]$ را با توجه به قیود زیر بهینه کند.
k قید مساوی به صورت
k $g_i(x) = 0, \quad \forall i = 1, 2, ..., k$ (29)
و M قید نامساوی به صورت

 $h_j(\mathbf{x}) \le \mathbf{0} \quad \forall \ j = \mathbf{1}, \mathbf{2}, \dots, \mathbf{M}$ (30)

2-4- بهینهسازی چند هدفه با الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه که کاملا تصادفی است و بر اساس تابع هدف تعیین شده برای مسئله ارزیابی می گردد، یک جستجوی سرتاسری را آغاز می کند و سپس با ترکیب معیارهای انتخاب، همگذری و جهش از نقاط اکسترمم محلی، جهت یافتن بهترین جواب استفاده می کند. مسئله بهینه سازی چند هدفه شامل ماکزیمم یا مینیمم کردن همزمان چند تابع هدف با تعدادی قیود تساوی و غیرتساوی می باشد. الگوریتم ژنتیک چند هدف مورد مطالعه، الگوریتم ژنتیک با رتبه بندی نامغلوب 2 می باشد. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک تک هدفه، دو مرحلهی اعمال روش مرتب-سازی نامغلوب و محاسبه پارامتر کنترلی فاصله جمعیت می باشد که در ادامه بطور مختصر توضیح داده شده اند. در شکل 4 فلوچارت مربوط به الگوریتم ژنتیک با رتبه بندی نامغلوب 2 آورده شده است.

	نامغلوب	4-2-1- مر تبسازی ن
بنهسازی را که دارای دو	کلیت قضیه، یک مسئله کمی	بدون از دست دادن
	<i>ط</i> و <i>A</i> است، در نظر می گیریم.	متغیر تصمیم گیری 3
	ر B غلبه دارد در صورتی که:	طبق تعريف A بر
$(f_i(A) \leq f_i(B))$	برای تمامی توابع هدفها	
$f_i(A) < f_i(B)$	برای حداقل یک تابع هدف	(31)
هیچ بردار ورودی دیگری	بردار یا بردارهای ورودی که	با این تعریف، به

1- Net present value

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

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[16]. داریم[16]. (23) $(-f^*)^n (1+i)^{-n} + (-f^*)^n (1+i)^{-n}$ تا هزینه کلی مصرف در ابا یکدیگر جمع میکنیم تا هزینه کلی مصرف شده برای رکوپراتور بدست آید. **Cost** = $c_{\text{ope},p} + c_{\text{Maintenance},p} + c_{\text{Capital},p}$ (24) سود بدست آمده از این مبدل، ناشی از کاهش مصرف سوخت میباشد.

114

(21)

بر آنها غلبه نداشته باشد، بردار ورودی غلبه نشده¹ گفته می شود. مجموعه بردارهایی (بردارهای شامل متغیرهای طراحی) که همگی غلبه نشده باشند جبهه بهینه پارتو² نامیده می شوند. بنابراین جوابهای بهینه در یک مسئله بهینه سازی چند هدفه، مجموعه جوابهای غلبه نشده می باشند. اگر با دید ریاضی به قضیه نگریسته شود الگوریتم بهینه سازی باید با رسیدن به اولین نقطه بهینه پارتو متوقف گردد؛ اما از آنجا که مناسب بودن جواب به دست آمده بستگی به فاکتورهای مختلفی نظیر انتخاب طراح برای شرایط مختلف دارد، معمولا به دست آوردن مجموعه نقاط بهینه پارتو مطلوب و به عنوان هدف در حل مسائل بهینه سازی چند هدفه قرار می گیرد.

2-2-4- فاصله ازدحام³

برای تخمین پراکندگی جوابها حول یک نقطه (جواب) خاص از جمعیت، فاصله میانگین دو نقطه در دو طرف آن نقطه خاص در راستای هریک از توابع هدف در نظر گرفته می شود. مقدار فاصله ازدحامی در نقطه i ، برابر است با اندازه بزرگترین مکعب دربرگیرنده نقطه i که هیچ نقطه دیگری از جمعیت در آن قرار نداشته باشد. نکته مهم اینکه این فاصله برای اعضای جمعیت هر جبهه بطور جداگانه محاسبه می شود و مقایسه بین فاصلهها نیز تنها بین اعضای جبههها، بطور جداگانه انجام می شود.



5- توابع هدف، پارامترهای طراحی و قیود

در این تحقیق، کارایی رکوپراتور برای حداکثر شدن و هزینه مصرفی برای حداقل شدن به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شدهاند. گام پره، فاصله بین صفحات(ارتفاع پره)، طول نوار، طول مسیر سیال سرد، طول مسیر سیال گرم و طول مسیر بدون جریان به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفته شدهاند. در جدول 1 محدوده تغییر پارامترهای طراحی آورده شده است.

قیود موجود در مسئله شامل قیود موجود در روابط مربوط به فاکتور اصطکاک و ضریب انتقال حرارت، قید عدد رینولدز، قید افت فشار و قید کارایی میشود. با توجه به اینکه در مبدلهای حرارتی فشرده عدد رینولدز میبایست بین 500 تا 1500 باشد [18] ، این قید برای عدد رینولدز لحاظ شده است. از آنجا که فشار گاز خروجی از سیکل توربین گاز نمیتواند کمتر از فشار اتمسفر باشد میبایست مجموع افت فشارها طوری باشد که فشار خروجی از رکوپراتور، حداقل به اندازه فشار اتمسفر باشد. قید آخر مسئله مورد بررسی، قید کارایی مبدل میباشد که به انتخاب طراح، حد پایین آن 70 درصد فرض شده است. بیشتر قیود بصورت تابع جریمه به توابع هدف اضافه شدند. مقدار حداکثری $^{6-}$ 10 برای میانگین تغییرات در گسترش نقاط پارتو⁴ به عنوان معیار توقف بهینهسازی لحاظ گردید.

6- نمونه موردی

بهینه سازی صورت گرفته در این مقاله مربوط به رکوپراتور یک میکروتوربین 200 kW می باشد. برخی از داده های سیکل میکروتوربین در جدول 2 آورده شده اند. بعضی از این داده ها از کاتالوگ مربوط به میکروتوربین **200 kW** کپستون⁵ گرفته شده است [19] و بعضی دیگر فرضیات در نظر گرفته شده توسط نویسندگان است([13] و [20]). سایر اطلاعات مربوط به سیکل، از تحلیل ترمودینامیکی آن در نرم افزار ترموفلکس بدست آمدند. دمای مرجع برای حل معادله انرژی در محفظه احتراق 21.855 درجه کلوین در نظر گرفته شده است. سوخت در نظر گرفته شده برای احتراق دیزل مایع می باشد. اطلاعات اقتصادی در جدول 3 آورده شده است. برخی از این اطلاعات نظیر قیمت برق مربوط به شرایط اقتصادی ایران می باشد و برخی دیگر اطلاعات فرض شده در این مسئله می باشد [10].

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 347 به عنوان مواد رکوپراتور در نظر گرفته شده است [21]. خواص سیالات و جامدات بصورت تابعی از دما در نظر گرفته شدهاند. ضخامت صفحات جدا کننده و ضخامت پره به ترتیب **0.2 mm** و **0.1 mm** انتخاب شدهاند. ضرایب رسوب مجاز از مرجع [22] گرفته شدهاند. برای ضرایب افت فشار در

جدول 1 محدوده تغییر پارامترهای طراحی

Table 1 Range of design parameters		
كران بالا	كران پايين	کمیتھا
3 × 10 ⁻³	10 ⁻³	گام پرہ (m)
10×10^{-3}	2×10^{-3}	ارتفاع پرہ (m)
6 × 10 ⁻³	3 × 10 ⁻³	طول نوار (m)
1	0.1	طول مسیر سیال سرد(m)
1	0.1	طول مسیر سیال گرم (m)
1	0.1	طول مسير بدون جريان (m)

4- Average change in the spread of Pareto5- Capstone

Crossover Mutation

Fig. 4 Flowchart of NSGA-II

شکل 4 فلوچارت الگوریتم ژنتیک با رتبهبندی نامغلوب2

1- Non-dominated

2- Pareto-optimal front

3- Crowding Distance

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

جدول 2 شرایط کارکرد رکوپراتور و میکروتوربین

a microturbine operation conditions	able 2 Recuperator and
۔ کمیتھا	مقادير
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(X)	1039.1
ارزش حرارتی پایین سوخت(kJ/kg)	42557
نسبت فشار كمپرسور	4
نسبت فشار توربين	3.65
افت فشار محفظه احتراق (%)	4

جدول 3 دادههای اقتصادی برای نمونه موردی

Table 3 Economic data for case study	
مقادير	كميتها
10 20	i(%) f * (%)
0.14	$k_{\rm fuel}$ (\$/kg)
0.7587	$\eta_{\rm comp}$
0.000125 6000	$k_{ m el}$ (\$/kWh) $ au$ (hour)

ورود و خروج منحنیهای مناسبی به کمک نرمافزارهای گراف دیجیتایزر^۱ و متلب برازش شده است.

7- اعتبارسنجي و نتايج

1-7- 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 [5] انتخاب شده است. نتایج صحتسنجی در جدول 4 آورده شده است که دقت بالا کد نوشته برای طراحی مبدل را تایید می کند.

7-2- نتایج برای رکوپراتور با جریان متقاطع

7-2-1- نتايج بهينەسازى

در بهینه سازی چند هدفه به کمک الگوریتم ژنتیک، جواب نهایی به صورت مجموعه ای از جواب های بهینه می باشد که به منحنی بهینه پارتو معروف است، این نمودار برای رکوپراتور با آرایش جریان متقاطع در شکل 5 نشان داده شده است. محور افقی معکوس کارایی است و محور عمودی هزینه مصرفی کل بر اساس ارزش فعلی هزینه ها می باشد. با دقت در منحنی ذکر

شدند.) علت اینکه نقاط سمت راست منحنی قیود مسئله را ارضا میکنند این است که در سمت راست نمودار، کارایی کمتر بوده و در نتیجه افت فشار رکوپراتور کمتر میباشد و این باعث میشود قید مربوط به افت فشار برقرار باشد.

مشخصات هندسی رکوپراتورهای بهینه (طرحهای A و B) در جدول 5 آورده شده است. در جدول 6 مشخصات ترموهیدرولیکی و اقتصادی هر یک از طرحهای بهینه آورده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب هر یک از این طرحها بستگی به نظر طراح دارد.

7-2-2- مقایسه فنی و اقتصادی طرحهای بهینه

برای مقایسه فنی و اقتصادی طرحهای بدست آمده از دو معیار زیر استفاده شده است.

- الف) بازده سیکل: برای مقایسه فنی طرحهای بدست آمده بازده سیکل به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است و هر چه طرحی بازده سیکل بیشتری داشته باشد از نظر فنی مطلوبتر است.
- ب) ارزش فعلی هزینهها: برای مقایسه اقتصادی طرحهای بدست آمده ارزش فعلی هزینهها مبنای مقایسه قرار داده شده است. در یک پروژه مطلوب از نظر اقتصادی می بایست مقدار ارزش فعلی هزینهها مثبت باشد و هر چه این مقدار مثبت بیشتر باشد، پروژه از نظر اقتصادی بهتر هست.

مقادیر بدست آمده برای بازده سیکل و ارزش فعلی هزینهها در جدول 7 آورده شده است. نتایج نشان میدهد که طرح B از نظر فنی و اقتصادی بهتر است. زیرا از نظر فنی که بازده آن بیشتر است و از نظر اقتصادی نیز ارزش فعلی هزینهها آن بیشتر است. حال اگر بخواهیم طرحها را از نظر کارایی رکوپراتور با هم مقایسه کنیم، به این نتیجه میرسیم که طرح B کارایی بیشتری دارد همانطور که بازده و ارزش فعلی هزینه بیشتری دارد. برای توضیح بیشتر این مطلب میتوان گفت که بازده سیکل و ارزش فعلی هزینهها تابعی از افت فشار و کارایی رکوپراتور هستند. افت فشار با کاهش کار

جدول 4 اعتبارسنجی کد نوشته شده برای طراحی مبدل

Table 4 Modelin	ng verification	n results	
خطای نسبی(%)	مقادیر کد	مقادير مرجع	كميتها
1.41	0.8263	0.8381	کارایی
5.94	8.237	8.757	افت فشار سيال سرد(kPa)
6.04	8.503	9.05	افت فشار سیال گرم(kPa)



شده تصاد دو تابع به وصوح مشخص میباشد، بدین معنی که هر تعییر که
باعث افزایش کارایی رکوپراتور شود، افزایش هزینه را به همراه دارد و بر
عکس. بنابراین بهینهسازی چند هدفه با انتخاب توابع هدف مناسب برای این
مسئله صورت گرفت. نکته دیگری که راجع به نقاط منحنی بهینه پارتو
میتوان گفت این است که تمامی این نقاط غیرمغلوب هستند و هیچ برتری
نسبت به یکدیگر ندارند. نقاطی که با حروف الفبا انگلیسی در شکل مشخص
شدهاند جوابهای بهینه نهایی هستند، این جوابها قیدهای مسئله را بطور
کامل ارضا میکنند (قیود مسئله با افزودن توابع جریمه به توابع هدف اعمال

1- Graph Digitizer

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

خروجی سیکل، بازده آن را به مقدار ناچیزی کم میکند و با افزایش هزینه کارکرد(هزینه برق مصرفی توسط کمپرسور برای جبران افت فشار) هزینه مصرفی را به مقدار بسیار کمی افزایش میدهد. از طرفی کارایی بیشتر رکوپراتور باعث کاهش بیشتر مصرف سوخت میشود که این موضوع بازده سیکل را بصورت چشمگیری افزایش میدهد. همچنین رکوپراتور با کارایی بیشتر باعث اتلاف کمتر انرژی میشود و در نتیجه سود اقتصادی بیشتری را به همراه دارد. به عبارت دیگر تأثیر کارایی بر ردهبندی فنی و اقتصادی طرحها، بسیار بیشتر از تأثیر افت فشار بر این ردهبندیها است.

نکته مهم دیگر بررسی تأثیر کارایی بر هزینه مصرفی و ارزش فعلی هزینهها است. اگر به جداول 6 و 7 با دقت نگاه شود میتوان فهمید که طرح B با افزایش ناچیز در هزینه خرج شده نسبت به طرح A (طرح B 13503.4 دلار هزینه مصرفی کلی آن بیشتر است) سود بیشتری را به همراه دارد (ارزش فعلی هزینههای طرح B 28760 دلار بیشتر است). علت این موضوع به تأثیر کارایی بر هزینههای مصرفی و سود بدست آمده مرتبط میشود. به عبارتی دیگر با افزایش مقدار مشخصی در کارایی، سود بدست آمده به طور چشمگیری نسبت به هزینه مصرفی(ناشی از بالا بردن کارایی) زیاد میشود.

جدول 5 مشخصات هندسی طرحهای بهینه رکوپراتور با جریان متقاطع Table 5 Geometrical characteristics of optimal designs for cross-flow arrangement

			me
مقادير كميت	طرح A	طرح B	-
S (m)	0. 002929	0.002892	-
b (m)	0.00753	0. 003095	
x (m)	0.005088	0.004094	
L _c (m)	0.842176	0. 841867	
<i>L</i> _h (m)	0.772513	0. 855419	
<i>L</i> _n (m)	0.494603	0. 48426	

جدول 6 مشخصات ترموهیدرولیکی و اقتصادی طرحهای بهینه رکوپراتور با جریان متقاطع

Table 6 Thermo hydraulic and economic characteristics of optimal designs for cross-flow arrangement

	0	
مقادير كميت	طرح A	طرح B
کارایی	0.7726	0.8274
افت فشار(kPa)	3.094	5.913
هزينه کلي(\$)	302101.6	315605

7-3- نتایج برای رکوپراتور با جریان مخالف 7-3-1- نتایج بهینهسازی

نمودار پارتو بدست آمده برای رکوپراتور با جریان مخالف در شکل 6 نشان داده شده است. در این نمودار، محور افقی معکوس کارایی است و محور عمودی هزینه مصرفی کل بر اساس ارزش فعلی هزینه ها می باشد. این نمودار نیز به وضوح تضاد دو تابع هدف انتخاب شده را نشان می دهد. با دقت در نمودار می توان فهمید که تمامی نقاط غیر مغلوب می باشد. طرحهای بهینه نهایی که قیدها را ارضا می کنند با حروف الفبای انگلیسی مشخص شده اند.

8 مشخصات هندسی رکوپراتورهای بهینه (طرحهای C و D) در جدول 8 آورده شده است. در جدول 9 مشخصات ترموهیدرولیکی و اقتصادی هر یک از از طرحهای بهینه آورده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب هر یک از این طرحها بستگی به نظر طراح دارد.

7-3-2 مقایسه فنی و اقتصادی طرحهای بهینه

برای مقایسه فنی و اقتصادی طرحهای C و D مانند آنچه برای جریان متقاطع گفته شد، عمل شده است.

مقادیر بازده سیکل و ارزش فعلی هزینهها برای رکوپراتور با جریان مخالف در جدول 10 آورده شده است.

با دقت در جدول 10 به راحتی میتوان فهمید که طرح D هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی برتری دارد. حال اگر بخواهیم طرحها را از نظر کارایی رکوپراتور با هم مقایسه کنیم، به این نتیجه میرسیم که طرح D کارایی بیشتری دارد همانطور که بازده و ارزش فعلی هزینه بیشتری دارد. و این مطلب تأثیر چشمگیر کارایی بر معیارهای فنی و اقتصادی را نشان میدهد.

اگر به جداول 9 و 10 با دقت نگاه شود می توان فهمید که طرح D با افزایش ناچیز در هزینه خرج شده نسبت به طرح C (هزینه کل مصرفی طرح D 4925.2 دلار بیشتر است) سود بسیار بیشتری را به همراه دارد (ارزش فعلی هزینههای طرح D 32340.8 دلار بیشتر است). علت این موضوع به تأثیر کارایی بر هزینههای مصرفی و سود بدست آمده مرتبط می شود که در بخش مربوط به جریان متقاطع تشریح شد.

7-4- مقایسه نتایج رکوپراتور با جریان مخالف و متقاطع

در این قسمت طرحهای بدست آمده از دو بهینهسازی مجزا با یکدیگر



Fig. 6 Pareto-optimal front for recuperator with counter-flow arrangement

شکل 6 منحنی بهینه پارتو برای برای رکوپراتور با جریان مخالف

جدول 7 مقادیر بازده سیکل و ارزش فعلی سرمایه برای طرحهای بهینه در جریان متقاطع

Table 7 Cycle efficiency and NPV value for optimal designs of cross-flow arrangement

طرح B	طرح A	مقادير كميت
0.324	0.307	بازده سیکل کارایی
294591	265831	ارزش فعلی هزینهها(\$)

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

پیمان مقصودی و پد*ر*ام حنفیزاده

جدول 8 مشخصات هندسی طرحهای بهینه رکوپراتور با جریان مخالف Table 8 Geometrical characteristics of optimal designs for counter-flow arrangement

مقادیر کمیت ط	طرح C	طرح D	
361 <i>S</i> (m)	0.002361	0.002294	
<i>b</i> (m)	0.00355	0. 003551	
414 x (m)	0.004414	0. 004293	
762 <i>L</i> _c (m)	0. 402762	0. 585629	
78 <i>L</i> _h (m)	0.7278	0. 746415	
$L_{\rm n}$ (m)	0. 55731	0. 567663	

جدول 9 مشخصات ترموهیدرولیکی و اقتصادی طرحهای بهینه رکوپراتور با جریان مخالف

Table 9 Thermo hydraulic and economic characteristics of optimal designs for counter-flow arrangement

طرح D	طرح C	مقادير كميت
0.90279	0.85496	کارایی
4.21241	2.98979	افت فشار(kPa)
307024.6	302098.4	هزينه کلی(\$)

جدول 10 مقادیر بازده سیکل و ارزش فعلی سرمایه برای طرحهای بهینه در جریان مخالف

Table 10 Cycle efficiency and NPV value for optimal designs of counter-flow arrangement

مقادیر کمیت	طرح C	طرح D	
بازده سيکل	0.34591	0.37053	
ارزش ف ع لی هزینهها(\$)	329512.7	361852.5	

مقایسه می شوند. برای این کار از مفهوم مرتب سازی نامغلوب که در بخش بهینهسازی تشریح شد، استفاده شده است. با دقت در مقادیر بدست آمده برای توابع هدف دو طرح A و C می توان فهمید که طرح C کارایی بیشتری دارد و هزینه مصرفی آن نیز کمتر است و این یعنی طرح C بر طرح A غلبه دارد و از نظر طراح بهتر است. به همین دلیل از طرح A در بین گزینههای نهایی صرفنظر می کنیم. همین مقایسه را می توان برای طرحهای B و D انجام داد که مقادیر بدست آمده مغلوب بودن طرح B توسط طرح D را نشان میدهند. پس به طور کلی می توان گفت که طرحهای C و D بهتر بوده و به عنوان طرحهای نهایی انتخاب می شوند. این موضوع در شکل 7 نشان داده شده است. نکتهای که وجود دارد این است که طرحهای منتخب نهایی همگی مربوط به رکوپراتور با جریان مخالف می باشند. علت این امر این است که رکوپراتورهای جریان مخالف با صرف هزینه کمتر از رکوپراتورهای جریان متقاطع به كارايي حرارتي بالاتري ميرسند. اين موضوع به اين خاطر مي باشد که رکوپراتورهای جریان متقاطع برای رسیدن به کارایی بالا می بایست ابعاد بزرگتری داشته باشند در حالیکه این موضوع در رکوپراتورهای جریان مخالف به علت نوع آرایش جریان و ابعاد کوچکتر امکان پذیر است. البته اینکه در بین طرحهای نهایی، طرح(یا طرحهایی) از مبدل جریان متقاطع وجود داشته باشد، امکانیذیر هست که این موضوع به جوابهای بدست آمده از بهینهسازی بستگی دارد. اما در حالت کلی میتوان گفت که طرحهای بهینه

نهایی بیشتر از مبدل جریان مخالف(به دلیل عملکرد بهترشان که قبلا ذکر شد) خواهند بود.

8- نتیجه گیری

در این تحقیق مبدل صفحه پرهدار به عنوان رکوپراتور میکروتوربین بهینهسازی شده است. انتخاب کارایی رکوپراتور به عنوان یکی از توابع هدف بهینهسازی باعث متفاوت شدن این تحقیق نسبت به سایر کارها میباشد. هزینه رکوپراتور تابع هدف دیگری بود که در این تحقیق استفاده شد. الگوریتم ژنتیک چند هدفه با رتبهبندی نامغلوب 2 برای حداکثر کردن کارایی و حداقل کردن هزینه استفاده شد. شش متفیر هندسی رکوپراتور به عنوان پارامترهای بهینهسازی در نظر گرفته شدند. رکوپراتور صفحه پرهدار انتخاب شده دارای پره نواری و آرایش جریانهای متقاطع و مخالف میباشد. بهینهسازی به صورت مجموعهای از جوابهای بهینه (منحنی بهینه پارتو) ارائه شدند و انتخاب هر یک از طرحهای بهینه بدست آمده اختیاری بوده و به نظر طراح بستگی دارد. منحنیهای پارتو به خوبی تضاد دو تابع هدف انتخاب شده را نشان میدهند و این مطلب انتخاب درست توابع هدف برای

طرحهای بهینه بدست آمده از نظر فنی و اقتصادی با یکدیگر مقایسه شدند. بازده سیکل و ارزش فعلی هزینه ها به عنوان معیارهای فنی و اقتصادی برای مقایسه در نظر گرفته شدند. نتایج نشان می دهند که کارایی رکوپراتور نقش مهمی در مقایسه فنی و اقتصادی طرحها دارد. از طرفی دیگر مقایسه مقادیر بدست آمده برای هزینه مصرفی و سود بدست آمده نشان می دهد که با افزایش کارایی رکوپراتور سود بدست آمده نسبت به هزینه مصرفی، افزایش بیشتری به همراه دارد و این مسئله از نظر اقتصادی مطلوب می باشد. با توجه به این نکات، انتخاب کارایی رکوپراتور به عنوان یکی از توابع هدف که برای اولین بار در این تحقیق انجام شده است، می تواند باعث افزایش هر چه بیشتر مقدار کارایی شود و در نتیجه عملکرد سیکل را بهبود بخشد.

در انتها طرحهایی که از دو بهینهسازی مجزا بدست آمدند بوسیله مفهوم مرتبسازی نامغلوب با یکدیگر مقایسه شدند و طرحهای برتر بدست آمدند. نتایج نشان میدهد که طرحهای برتر مربوط به رکوپراتور با جریان مخالف هستند. البته این امکان وجود دارد که طرحهای برتر از جریان متقاطع هم باشند که این موضوع به جوابهای بدست آمده از بهینهسازی بستگی دارد. اما در حالت کلی با توجه به اینکه در رکوپراتورهای جریان مخالف با صرف



Fig. 7 Comparison of optimal designs for cross and counter flow arrangements

شکل 7 مقایسه طرحهای بهینه رکوپراتور با جریان مخالف و متقاطع

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

هزینه کمتر و به سبب نوع چیدمان جریان، کارایی بیشتری از جریان متقاطع بدست میآید، انتظار میرود بیشتر طرحهای نهایی از رکوپراتور با جریان مخالف باشند.

9- فهرست علائم

A_w	مساحت ديواره((m ²
A_{f}	سطح انتقال حرارت هر پره (m ²)
A	سطح کلی انتقال حرارت (m ²)
$A_{\min_{flow}}$	سطح آزاد جریان (m ²)
b	فاصله بین صفحات (m)
Ср	ظرفیت گرمایی در فشار ثابت(J/kgK)
\mathbf{C}^{*}	نسبت ظرفیت گرمایی
С	ضريب محاسبه قيمت تجهيزات(K/W)
$c_{ m f}$	سود ناشی از بازیافت گرما (\$)
Cost	هزینه کلی خرج شده (\$)
$c_{\rm ope}$	هزینه کارکرد (\$)
<i>C</i> _{purchase}	هزينه تجهيزات (\$)
c _{Capital}	هزینه سرمایه <i>گ</i> ذاری(\$)
<i>C</i> _{Maintenance}	هزینه تعمیرلت و نگهداری(\$)
$D_{\rm h}$	قطر هيدروليكى (m)
f	ضريب اصطكاك
f^*	نرخ تورم(%)
G	شار جرمی(kg/m ²s)
h	ضریب انتقال حرارت جابهجایی(W/m²K)
I	نرخ بهره(%)
j	ضريب كولبرن
K	ضریب هدایت حرارتی(W/mK)
$K_{\mathbf{e}}$	ضریب افت فشار در خروج
K _c	ضریب افت فشار در ورود
$k_{ m el}$	قیمت برق(MWV/h)
$k_{ m f}$	قيمت سوخت(\$/kg)
L_{n}	طول مسیر بدون سیال (m)
$L_{ m c}$	طول مسیر سیال سرد(m)
$L_{\rm h}$	طول مسیر سیال گرم(m)
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت(kJ/kg)
\dot{m}	دبی جرمی(kg/s)
n	عمر پروژه(year)
NPV	ارزش فعلی کل سرمایهها(\$)

دمای ورودی به توربین(X)	$T_{\rm TIT}$
دمای مرجع آنتالپی(K)	T_0
ضخامت پره(m)	t
ضریب انتقال حرارت کلی (W/K)	UA
دبی حجمی (m ³/ s)	$V_{\rm t}$
طول نوارها در پره نواری(m)	x
	علائم يونانى
دمای تصحیح شده(X)	$\Delta T_{\rm m}$
افت فشار(kPa)	ΔP
کارایی مبدل	3
راندمان یک پرہ	$\eta_{ m fin}$
راندمان مجموعه پرهها	$\eta_{ m s}$
راندمان کمپرسور	$\eta_{ m comp}$
ويسكوزيته(Pa.s)	μ
حجم مخصوص ميانگين(m ³/ kg)	$artheta_m$
چگالی(kg/m ³)	ρ
نسبت سطح جلو به سطح آزاد	σ
تعداد ساعات کار دستگاه در سال (hour)	τ
	زيرنويسها
هوا	а
ارزش پروژه درسال اول	Α
سرد	C
گاز	g
گرم	h
ورودى	i
میانگین	m
خروجى	0
ارزش فعلى پروژه	P
ديواره	w

10- مراجع

- [1] R. K. Shah, Compact heat exchangers for microturbines, in The Fifth Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Rochester Institute of Technology, Rochester, New York, USA, 2005.
- [2] P. Hanafizadeh, T. Parhizgar, A. Nouri Gheimasi, Analysis of microrecuperators in small-sized gas turbines-manufacturing potential of Iran, Energy Equipment and Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 1-12, 2015.
- [3] C. F. McDonald, Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 1463-1487, 2003.
- [4] A. Traverso, A. F. Massardo, Optimal design of compact recuperators for microturbine application, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No. 14, pp. 2054–2071, 2005.

- [5] R. K. Shah, D. P. Sekulic, Fundamentals of Heat Exchanger Design, pp. 38-39, 128, 382-391, 574-580, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003.
- [6] A. Pandey, Performance analysis of a compact heat exchanger, M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Rourkela, India, 2011.
- [7] R. M. Manglik, A. E. Bergles, Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, No. 2, pp. 171–180, 1995.
- [8] W. Qiuwang, L. Hongxia, X. Gongnan, Z. Min, L. Laiqin, F. ZhenPing, Genetic algorithm optimization for primary surfaces recuperator of microturbine, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 129, No. 2, pp. 436-442, 2006.
- [9] G. N. Xie, B. Sunden, Q. W. Wang, B. Sundén, Q. W. Wang, Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 8, pp. 895–906, 2008.

NTU	تعداد واحدهاى انتقال
Р	فشار(kPa)
Pr	عدد پرنتل
Q	گرمای بازیاب شده(W)
Re	عدد رينولدز
$R_{ m f}$	ضریب رسوب(m²K/W)
S	گام پرہ(m)
St	عدد استانتون
Т	دما(K)

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1

- [16] M. M. Oskonejad, *Engineering Economy*, pp. 67-70, 91-94, Tehran, Iran: Amirkabir University of Thechnology, 1998. (in Persian فارسی)
- [17] H. Safikhani, Modeling and multi objective optimization of centrifugal pump by computational fluid dynamic, neural network and genetic algorithm, M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Iran 2010. (in Persian فارسی)
- [18] M. R. M. Ektesabi, *Compact Heat Exchangers*, pp. 168, Tehran, Iran: Sherkate Radiatore Iran, 1992. (in Persian فارسی)
- [19] Capstone turbine, 2014; http://www.capstoneturbine.com.
- [20] M. Sharafi, M. Boroushaki, A. Gholizadeh, Optimization of micro gas turbine cycle using genetic algorithm, in *The 18th Conference of the Iran Socitey of Mechanical Engineering*, Sharif University of Thecnology, Tehran, Iran, 2010. (in Persian فارسي)
- [21] O. O. Omatete, P. J. Maziasz, B. A. Pint, D. P. Stinton, Assessment of recuperator materials for microturbines, Oak Ridge National Laboratory, USA, pp. 1-21, 2000.
- [22] A. A. Rostami, *Design of Heat Exchangers*, pp. 783-786, Isfahan, Iran: Isfahan University of Technology, 1994. (in Persian فارسي)

- [10] H. Najafi, B. Najafi, P. Hoseinpoori, Energy and cost optimization of a plate and fin heat exchanger using genetic algorithm, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 10, pp. 1839–1847, 2011.
- [11] S. Sanaye, H. Hajabdollahi, Thermal-economic multi-objective optimization of plate fin heat exchanger using genetic algorithm, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 6, pp. 1893–1902, 2010.
- [12] H. Zare, S. Banooni, A. Ghanbarzadeh, Optimal design of plate-fin heat exchangers by a bees algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 22–29, 2012. (in Persian)
- [13] M. Pourhasanzadeh, A. F. Najafi, Energy and exergy analysis of microturbine and its thermal-economic-environmental optimization by genetic algorithm, in *The 19th Conference of the Iran Socitey of Mechanical Engineering*, Birgand, Iran, 2011. (in Persian, 1990)
- [14] Energy Efficiency Best Practice programme, *Compact Heat Exchangers : a Training Package for Engineers*, UK: ESTU, WS Atkins Consultants Ltd, pp. 160-185, 2000.
- [15] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*, pp. 333-353, New York: John Wiley & Sons, 1996.

مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1395، دورہ 16، شمارہ 1