



Exergy Analysis and Multiobjective Optimization of Microturbine Based Multigeneration Energy System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Rashidi F.^{*1} PhD,
Rashidi H.² PhD

How to cite this article

Rashidi F, Rashidi H. Exergy Analysis and Multiobjective Optimization of Microturbine Based Multigeneration Energy System. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):347-362.

¹Electrical & Computer Engineering Department, Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran

²Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, University of Hormozgan, Km 9 of Minab Road, Bandarabbas, Iran. Postal Code: 7916193145
Phone: +98 (76) 33711041
Fax: +98 (76) 33711041
rashidi@hormozgan.ac.ir

Article History

Received: August 15, 2018
Accepted: September 1, 2018
ePublished: February 01, 2019

ABSTRACT

In this paper, using a thermodynamic rules, a multigeneration energy system with an initial stimulus of microturbine has been modeled. Then, using the concept of exergy and applying economic and environmental functions, exergy efficiency and total cost rate are calculated as two objective functions. Due to the contradiction of the objective functions, a multiobjective firefly algorithm is used to optimize the system. To accelerate the process of optimization and to prevent algorithm capture in local optimizations, new algorithms have been added to the innovative algorithm. The result of applying the algorithm on the multigeneration energy system will result in a set of Pareto-optimal solutions, indicating the compromise between the target functions. A fuzzy decision making based on max-min approach is used to select the desired solution between the Pareto-optimal solutions. In order to evaluate the efficiency of the proposed optimization algorithm, the results of this algorithm are compared with two particle swarm optimization algorithms and multi-objective genetic algorithm. Based on the results of system optimization, the exergy efficiency can increase up to 69%. Also, considering the total cost rate of the system as the only target function, this can be reduced to 572\$/h.

Keywords Exergy-economic Analysis; Multiobjective Optimization; Microturbine; Multigeneration Energy System; Firefly Optimization Algorithm

CITATION LINKS

[1] Thermodynamic modeling and ... [2] Energy, exergy and economic assessments of a ... [3] Energy and exergy analyses of a solar-biomass ... [4] Analysis of a gas turbine based hybrid system ... [5] The exergy and energy level analysis of a combined ... [6] Energy and exergy analyses of a new ... [7] Energy, exergy, and economic evaluations of a ... [8] A novel method based on multi-population ... [9] Examination of a new solar-based integrated system ... [10] Techno-economic assessment of a solar-geothermal ... [11] Thermo-economic optimization of solar CCHP using both ... [12] Assessment of new operational strategy in optimization ... [13] Multi-objective optimization for operational parameters ... [14] Techno-economic optimization of a shell and tube ... [15] Optimal integration of renewable energy sources for autonomous tri-generation ... [16] Optimization of autonomous combined heat and power system including ... [17] Examination of energy price policies in Iran for optimal ... [18] Parametric optimization of supercritical coal-fired ... [19] Size optimization for hybrid photovoltaic-wind energy system using ... [20] A two-stage optimal planning and design ... [21] Multi-objective optimization of a novel ... [22] Multi-objective optimization of an ocean thermal energy ... [23] Multi-objective optimization of evaporator of organic ... [24] Multi-objective optimization of a combined cooling ... [25] 4E analysis and multi-objective optimization ... [26] Modeling a novel CCHP system including solar ... [27] Modeling a novel CCHP system including solar ... [28] Exergoeconomic analysis and optimization of a solar ... [29] Exergy-based thermal management of a steelmaking process ... [30] A novel solar-biomass based multi-generation ... [31] Exergy analysis and optimization of an integrated micro gas ... [32] Thermodynamic analysis of a novel ... [33] Development, analysis and assessment of solar energy-based ... [34] Thermo-economic multi-objective optimization of a novel ... [35] 4E analysis and multi-objective optimization ... [36] A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for ... [37] An improved teaching-learning-based optimization ... [38] Artificial acari optimization as a new strategy for global ... [39] Multi-objective particle swarm optimization with ... [40] A fast and elitist multiobjective genetic ... [41] Optimization of micro-grid system ...

تحلیل انرژی و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید چندگانة بر پایه میکروتوربین

فرزانه رشیدی* PhD

گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

حلیمه رشیدی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

چکیده

در این مقاله با استفاده از قوانین ترمودینامیکی، یک سیستم تولید چندگانة بر پایه میکروتوربین مدل‌سازی شده‌است. سپس با استفاده از مفهوم انرژی و به‌کارگیری توابع اقتصادی و زیست‌محیطی، راندمان انرژی و نرخ هزینه کل به‌عنوان دو تابع هدف سیستم محاسبه شده‌اند. با توجه به متضاد بودن توابع هدف، برای بهینه‌سازی سیستم از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب چندهدفه استفاده شده‌است. به‌منظور تسریع در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی به الگوریتم اضافه شده‌اند. نتیجه اعمال الگوریتم بر سیستم تولید چندگانة مورد مطالعه، منجر به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو خواهد شد که نشان‌دهنده ناحیه مصالحه بین توابع هدف است. برای انتخاب جواب نهایی از بین چندین جواب بهینه موجود از روش تصمیم‌گیری فازی max-min بهره گرفته شده‌است. به‌منظور بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی نتایج حاصل از این الگوریتم با دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مقایسه شده‌است. براساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم، راندمان انرژی می‌تواند تا ۶۹٪ افزایش یابد. همچنین با در نظر گرفتن نرخ هزینه کلی سیستم به‌عنوان تنها تابع هدف، این مقدار می‌تواند تا 572\$/h کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل انرژی- اقتصادی، بهینه‌سازی چندهدفه، میکروتوربین، سیستم تولید چندگانة، الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۱۰

* نویسنده مسئول: rashidi@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی در کنار تجدیدنظیربودن آنها و همچنین تقاضای روزافزون مصرف انرژی باعث شده‌است تا برنامه‌ریزان بخش انرژی به دنبال استفاده از سیستم‌های با راندمان بالاتر و جایگزینی نیروگاه‌های تولید توان متمرکز با روش‌های جدید تولید توان باشند. یکی از راهکارهای اصولی برای دستیابی به این اهداف، استفاده از سیستم‌های تولید چندگانة است. در سیستم‌های تولید چندگانة می‌توان علاوه بر تامین توان الکتریکی، از حرارت‌های اضافی برای تامین نیازهای مختلف از جمله تولید سرمایش، گرمایش، آب آشامیدنی و آب گرم استفاده نمود^[1]. بهره‌گیری از این فناوری به دلیل وجود مقدار زیادی تلفات هنگام تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی یا الکتریکی می‌تواند علاوه بر افزایش قابل ملاحظه راندمان، موجب کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های کلی سیستم شود^[2].

تاکنون در زمینه مدل‌سازی و تحلیل انرژی- اقتصادی سیستم‌های تولید چندگانة مطالعات متعددی انجام شده‌است. به‌طور نمونه پژوهشی^[3] عملکرد اقتصادی و ترمودینامیک یک سیستم تولید توان مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست‌توده را بررسی نموده‌است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که راندمان ترمودینامیک سیستم ترکیبی ۱۸/۱۳٪ است. این در حالی بوده که راندمان سیستم وقتی به‌تنهایی از انرژی خورشیدی استفاده می‌شود حدود ۱۵/۷۹٪ است. در یک مطالعه^[4] تحلیل انرژی- اقتصادی

اقتصادی سه سیستم تولید سه‌گانه با محرک اولیه میکروتوربین، زیست‌توده و انرژی خورشید بررسی شده‌است. نتایج نشان می‌دهد سیستم میکروتوربین با راندمان انرژی ۵۴/۵٪ دارای بالاترین راندمان انرژی است. همچنین از لحاظ هزینه نیز بیشترین هزینه مربوط به سیستم فتوولتائیک و کمترین هزینه برای سیستم زیست‌توده است. از دیدگاه آلاینده‌گی نیز میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای سیستم زیست‌توده بیشتر از دو سیستم دیگر گزارش شده‌است. نویسندگان پژوهشی^[5]، یک سیستم تولید چندگانة با محرک اولیه میکروتوربین را در نظر گرفته و با آنالیز انرژی و انرژی سیستم نتیجه گرفته‌اند که راندمان سیستم چندگانة بالاتر از راندمان هر یک از این سیستم‌ها به‌تنهایی است. در یک پژوهش^[6] مطالعه‌ای روی یک سیستم تولید چندگانة بر مبنای انرژی ژئوترمال و خورشید انجام شده‌است. این سیستم شامل سیکل رنکین، سیستم ذخیره انرژی حرارتی، چیلر جذبی، پمپ حرارتی و سیستم خشک‌کن است. سیستم مورد مطالعه با استفاده از روش‌های انرژی و انرژی برای چهار حالت تولید توان، تولید توان و حرارت، تولید سه‌گانه و تولید چندگانة مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهند که راندمان انرژی و انرژی سیستم مذکور در حالت تولید چندگانة به‌ترتیب ۵۱ و ۶۲٪ بوده، در حالی که برای حالت تک‌منظوره تولید توان، این راندمان به‌ترتیب ۲۲ و ۵۴٪ گزارش شده‌است. پژوهشی^[7] با انجام ارزیابی‌های انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید توان، بخار و هیدروژن بر پایه میکروتوربین نتیجه گرفته‌است که هزینه‌های برآوردشده برای تولید توان، بخار و هیدروژن، ۴/۸۱ سنت به ازای هر کیلووات ساعت توان، ۲۰/۵۶ دلار به ازای هر تن بخار و ۱۳/۹۶ دلار به ازای هر کیلوگرم هیدروژن است. همچنین با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته، راندمان انرژی برای سیستم مذکور برابر با ۵۲/۰۹٪ محاسبه شده‌است.

در بحث بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندگانة نیز تاکنون تحقیقات مختلفی انجام گرفته و الگوریتم‌های بهینه‌سازی متنوعی پیشنهاد شده‌است. به‌طور نمونه، پژوهشی^[8] بهینه‌سازی انرژی و اقتصادی یک سیستم تولید سه‌گانه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار داده‌است. نتایج نشان می‌دهد در حالت بهینه، هزینه تولید محصولات در مقایسه با حالت پایه می‌تواند تا حدود ۹/۹٪ کاهش یابد. پژوهش دیگری^[9] نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، یک سیستم تولید چندگانة را با ده پارامتر طراحی و بهینه‌سازی نموده‌است. در این پژوهش نشان داده شده‌است که با انتخاب یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب می‌توان هزینه سوخت سیستم را تا حدود ۱۶٪ کاهش داد. مطالعه‌ای^[10] به بهینه‌سازی زیست‌محیطی و انرژی یک نیروگاه تولید دوده‌ده با تولید همزمان ۵۰ مگاوات برق و ۳۳/۳ کیلوگرم بر ثانیه بخار اشباع در فشار ۱۳/۳ بار پرداخته‌است. در این پژوهش تابع هدف جدیدی ارائه شده که شامل تابع هزینه عملیاتی، هزینه سوخت و هزینه تولید آلاینده‌ها است. همچنین برای کمینه‌کردن توابع هدف از الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه بهره گرفته‌است. نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم نشان می‌دهد با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی می‌توان هزینه کلی را تا ۹/۸٪ کاهش داد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مورد استفاده در طراحی بهینه سیستم‌های تولید همزمان به دو دسته کلی الگوریتم‌های تک‌هدفه و چندهدفه تقسیم‌بندی می‌شوند. از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه مورد استفاده می‌توان به الگوریتم ژنتیک^[11] و الگوریتم ازدحام ذرات^[15-17]، الگوریتم تکامل تفاضلی^[18] و

۱- مدل‌سازی ترمودینامیک سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین که هر یک از این سیستم‌ها از زیرسیستم‌های چیلر جذبی، سیکل رنکین آبی، آب‌گرمکن برای تولید آب گرم و آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس برای تولید آب شیرین تشکیل شده است.

۲- محاسبه نرخ انرژی هر جریان از سیستم، تعیین میزان نرخ اتلاف انرژی و راندمان انرژی و در نظر گرفتن نیازهای گرمایشی، سرمایشی و توان الکتریکی و همچنین تلاش در تامین آب گرم و آب آشامیدنی مورد نیاز سیستم

۳- تعیین توابع هدف مناسب براساس تحلیل انرژی- اقتصادی و در نظر گرفتن قیود بهینه‌سازی

۴- بهینه‌سازی سیستم‌های مذکور با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه

۵- مقایسه کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک چندهدفه نامغلوب.

۲- سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین

شکل ۱، دیاگرام سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین را نشان می‌دهد. در این سیستم از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت استفاده می‌شود. همچنین تولید حرارت، توان الکتریکی، آب آشامیدنی، آب گرم و سرمایش نیز به‌کمک این سوخت انجام می‌شود. عملکرد کلی سیستم بدین صورت است که هوا با فشار و دمای محیط در نقطه ۱ وارد کمپرسور و هوای متراکم شده پس از ترک کمپرسور در نقطه ۲ وارد محفظه احتراق می‌شود. در محفظه احتراق علاوه بر هوای گرم، سوخت نیز به محفظه تزریق می‌شود که باعث انجام واکنش احتراق خواهد شد. در نهایت گازهای گرم احتراق‌یافته، از محفظه احتراق، خارج و با عبور از توربین برای تولید توان استفاده می‌شوند. از طرفی گاز منبسط‌شده در توربین گاز در نقطه ۴ به‌صورت بخار وارد اواپراتور می‌شود. در این قسمت هدف، تولید بخار با فشار بالا است که از این بخار فشار بالا، در توربین بخار برای تولید توان استفاده می‌شود (نقطه ۵). بخار فشار پایین نیز در نقطه ۱۱ وارد ژنراتور سیستم چیلر جذبی می‌شود و برای تولید بار سرمایشی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. چون بخار فشار پایین وارد شده به سیستم هنوز دارای انرژی است، برای استفاده بهینه از سیستم، از این انرژی در نقطه ۲۶ برای تامین آب گرم با دمای 50°C استفاده می‌شود. مقداری از انرژی الکتریکی تولیدشده در سیکل رنکین ایده‌آل صرف تامین توان سیستم می‌شود. مابقی انرژی نیز برای راه‌اندازی سیستم آب‌شیرین‌کن و تولید آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

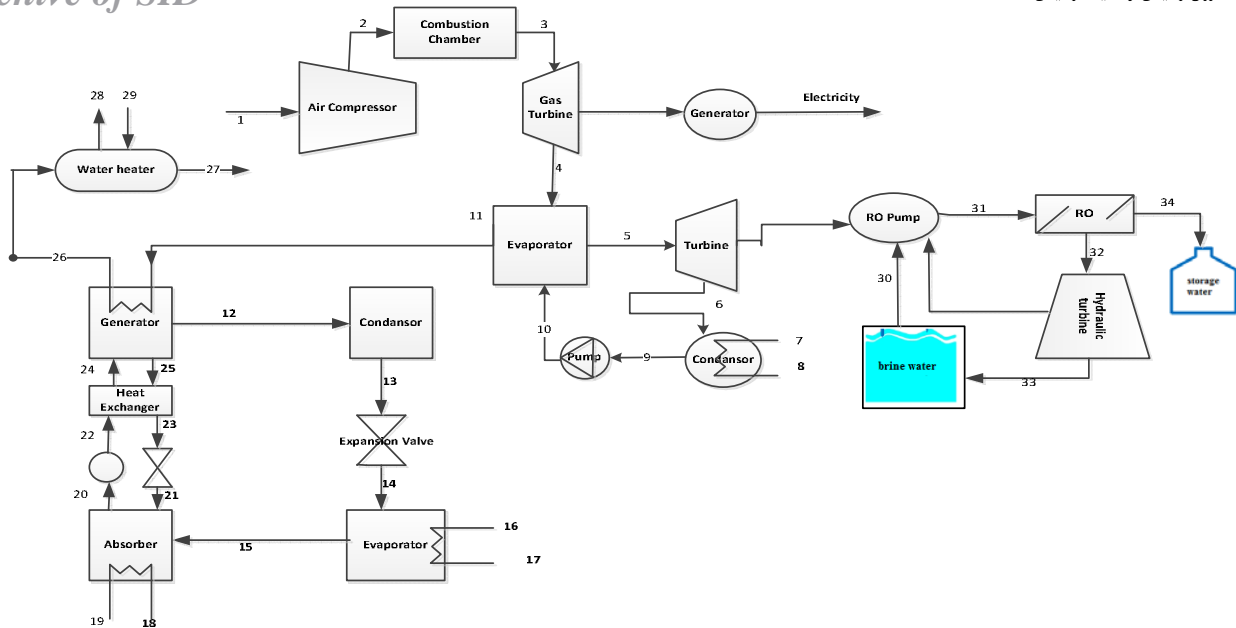
در سیکل آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس (RO)، آب شور در نقطه ۳۰ وارد پمپ می‌شود که در این سیکل از پمپ فشار بالای RO برای افزایش فشار آب استفاده می‌شود. آب غیرقابل شرب در فشار بالا پمپ RO را ترک می‌نماید و در نقطه ۳۱ وارد واحد اسمز معکوس می‌شود. آب تولیدشده در این قسمت در مخازن ذخیره برای استفاده‌های آبی ذخیره می‌شود (نقطه ۳۴). بقیه آب شور خروجی از RO که دارای فشار بالایی است، در نقطه ۳۲ وارد توربین هیدرولیک می‌شود و برای کاهش فشار و همچنین تولید الکتریسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت آب شور در فشار پایین در نقطه ۳۳ توربین را ترک می‌کند و این سیکل دوباره تکرار می‌شود.

الگوریتم کلونی مورچه [19] اشاره کرد. با توجه به این که در تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندانگانه، اهداف متضاد مختلفی همچون افزایش راندمان انرژی، کاهش هزینه‌ها و آلاینده‌گی مد نظر است، بنابراین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه نمی‌توانند تمامی این اهداف را به‌طور همزمان برآورده سازند [20]. از این‌رو در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی بهینه سیستم‌های تولید همزمان به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور نمونه، در چند پژوهش [21-23] سعی شده است تا با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک چندهدفه و با لحاظ کردن اهداف مختلف انرژی- اقتصادی، مقادیر بهینه پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم‌های تولید همزمان محاسبه شوند. از جمله الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند چندهدفه دیگری که برای طراحی بهینه سیستم‌های تولید سه‌گانه و چندانگانه مورد استفاده قرار گرفته است، می‌توان به الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه [24-26] و الگوریتم تکامل تفاضلی چندهدفه [27, 28] اشاره کرد.

سیستم‌های تولید چندانگانه از محرک‌های اولیه گوناگونی برای تولید توان استفاده می‌کنند که مهم‌ترین آنها عبارت از میکروتوربین‌ها، موتورهای احتراق داخلی، موتورهای احتراق خارجی، پیل‌های سوختی، انرژی خورشیدی، انرژی زیست‌توده، انرژی جزر و مدی و انرژی‌های زمین‌گرمایی هستند [29, 30]. در حال حاضر میکروتوربین‌ها به‌دلیل داشتن مزایای متعددی از جمله قابلیت جابه‌جایی به محل، کوتاه‌بودن زمان نصب و راه‌اندازی سریع، یکی از پرکاربردترین تولیدکننده‌های برق به‌شمار می‌روند.

هدف این مقاله، تحلیل انرژی- اقتصادی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین است. بدین منظور ابتدا با استفاده از قوانین ترمودینامیک، هر یک از اجزا و بخش‌های سیستم مدل‌سازی خواهند شد. سپس با استفاده از مفهوم انرژی و انرژی و نیز به‌کارگیری پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی، توابع هدفی استخراج خواهد شد که در آن متغیرهای مختلفی همچون هزینه‌های اقتصادی به‌همراه راندمان انرژی و پارامترهای آلاینده‌گی لحاظ شده باشد.

استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب برای حل مساله بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندانگانه، تاثیر بسزایی بر انتخاب طرح نهایی خواهد داشت. برای نیل به این هدف، در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب استفاده شده است. با توجه به این که الگوریتم مذکور برای حل مسایل بهینه‌سازی تک‌هدفه به کار می‌رود، برای اعمال قیود و اهداف مختلف مورد نظر در مساله بهینه‌سازی سیستم مورد مطالعه، ساختار الگوریتم مذکور به‌گونه‌ای تغییر داده شده است که امکان اعمال آن برای حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه نیز وجود داشته باشد. به‌منظور تسریع در فرآیند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، اصلاحاتی روی الگوریتم بهینه‌سازی انجام شده است. یکی از ویژگی‌های بارز الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، حفظ کیفیت و تنوع در مجموعه جواب‌هایی است که به‌عنوان جواب‌های نهایی انتخاب می‌شوند. برای تعیین یک جواب از بین چندین جواب موجود، از سیستم تصمیم‌گیر فازی استفاده شده است. برای ارزیابی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، نتایج حاصل از این الگوریتم با دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه پرکاربرد شامل ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات مقایسه شده است. جنبه‌های نوآوری مقاله به‌شرح زیر است:



شکل ۱) دیاگرام سیستم تولید چندگانه با محرک اولیه میکروتوربین

هزینه خرید کمپرسور هوا تابعی از دبی جرمی هوا، نسبت فشار کمپرسور و راندمان ایزنتروپیک کمپرسور است. تابع هزینه را می‌توان به شرح زیر بیان نمود [32]:

$$Z_{AC} (\$) = 44.71 \dot{m}_{air} \frac{1}{0.95 - \eta_{AC}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (5)$$

محفظه احتراق: خروجی محفظه احتراق تابعی از دبی جرمی هوا، ارزش حرارتی پایین سوخت (LHV) و راندمان محفظه احتراق بوده که به صورت زیر است [32]:

$$\dot{m}_a h_2 + \dot{m}_f LHV = \dot{m}_g h_3 + (1 - \eta_{cc}) \dot{m}_f LHV \quad (6)$$

فشار خروجی محفظه احتراق با در نظر گرفتن افت فشار در سراسر محفظه احتراق به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\frac{P_3}{P_2} = 1 - \Delta P_{cc} \quad (7)$$

در رابطه فوق، ΔP_{cc} بیانگر افت فشار در سراسر محفظه احتراق و η_{cc} نیز راندمان محفظه احتراق است. سوخت مورد استفاده در محفظه احتراق ترکیبی از گاز متان به همراه سایر گازها از جمله اتان، پروپان، کربن دی‌اکسید و نیتروژن است. میزان درصد مولی اجزای مختلف در جدول ۱ آورده شده است [4]. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که درصد عمده‌ای از سوخت مورد استفاده در محفظه احتراق، گاز متان است. زمانی که واکنش احتراق اتفاق می‌افتد، ضرایب مولفه‌های احتراق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} \lambda C_{x_1} H_{y_1} + (x_{O_2} O_2 + x_{N_2} N_2 + x_{H_2O} H_2O + x_{CO_2} CO_2 \\ + x_{Ar} Ar) \\ \rightarrow y_{CO_2} CO_2 + y_{O_2} O_2 + y_{N_2} N_2 \\ + y_{H_2O} H_2O + y_{NO} NO + y_{CO} CO \\ + y_{Ar} Ar \end{aligned}$$

$$y_{CO_2} = \lambda x_1 + x_{CO_2} - y_{CO},$$

$$y_{N_2} = x_{N_2} - y_{NO}, y_{H_2O} = x_{H_2O} + \frac{\lambda y_1}{2},$$

۳- آنالیز ترمودینامیک و اگزرژی- اقتصادی سیستم تولید چندگانه با محرک اولیه میکروتوربین

همان طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، سیستم مورد نظر مشکل از ۵ زیرسیستم است که برای تولید توان، سرمایه‌گذاری، گرمایش، آب گرم مصرفی و آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنالیز ترمودینامیک و آنالیز اگزرژی- اقتصادی سیستم مذکور با محرک اولیه میکروتوربین در ادامه آمده است.

۳-۱- سیکل توربین گاز

سیکل توربین گاز شامل کمپرسور، محفظه احتراق و توربین گاز است.

کمپرسور هوا: هوا با شرایط فشار محیط و دمای اولیه T_1 وارد کمپرسور می‌شود. دمای خروجی از کمپرسور تابعی از راندمان ایزنتروپیک کمپرسور (η_{AC})، نرخ فشار کمپرسور (r_{AC}) و نرخ گرمای مخصوص به صورت زیر است [31]:

$$T_2 = T_1 \times \left(1 + \frac{1}{\eta_{AC}} \left(r_{AC}^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right) \right) \quad (1)$$

نرخ کار کمپرسور تابعی از نرخ جریان جرمی هوا (\dot{m}_a)، گرمای مخصوص هوا و اختلاف دما است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{W}_{AC} = \dot{m}_a C_{pa} (T_2 - T_1) \quad (2)$$

در رابطه فوق، γ_a نرخ گرمای مخصوص هوا و C_{pa} نیز به عنوان تابعی از دما به صورت زیر عمل می‌کند [31]:

$$C_{pa}(T) = 1.048 - \left(\frac{3.83T}{10^4} \right) + \left(\frac{9.45T^2}{10^7} \right) - \left(\frac{5.49T^3}{10^{10}} \right) + \left(\frac{7.92T^4}{10^{14}} \right) \quad (3)$$

نرخ اتلاف اگزرژی برای کمپرسور هوا به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{E}_{x_{D,AC}} = \dot{E}_{x_1} - \dot{E}_{x_2} - \dot{W}_{AC} \quad (4)$$

(۱۷)

$$C_{pg}(T) = 0.991 + \left(\frac{6.997T}{10^5}\right) + \left(\frac{2.712T^2}{10^7}\right) - \left(\frac{1.2244T^3}{10^{10}}\right)$$

نرخ اتلاف انرژی برای توربین گاز به صورت زیر خواهد بود:

$$\dot{E}_{x_{D,GT}} = \dot{E}_{x_3} - \dot{E}_{x_4} - \dot{W}_{GT} \quad (۱۸)$$

هزینه خرید توربین گاز تابعی از دبی جرمی جریان گاز ورودی، نسبت فشار توربین گاز و راندمان ایزنتروپیک توربین گاز است [32].

$$Z_{GT}(\$) = 301.45 \dot{m}_{gas} \frac{1}{0.95 - \eta_{GT}} \ln\left(\frac{P_3}{P_4}\right) \left\{ \exp[0.025(T_3 - 1570)] \right\}$$

۲-۳- سیکل بخار

سیکل بخار شامل توربین بخار، پمپ و اواپراتور است که از این سیکل برای تولید توان، گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. آنالیز ترمودینامیک، انرژی سیکل رنگین در جدول ۲ ذکر شده است [31].

جدول ۲) آنالیز انرژی و انرژی سیکل بخار

اجزا	آنالیز ترمودینامیک	آنالیز انرژی
اواپراتور	$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{10} h_{10} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{11} h_{11}$ $T_{Pinch, Evap} = T_{11} - T_{10}$	$\dot{E}_{x_{D,GT}} = \dot{E}_{x_4} - \dot{E}_{x_5} + \dot{E}_{x_{10}} - \dot{E}_{x_{11}}$
توربین	$\eta_{ST} = \frac{\dot{W}_{st,act}}{\dot{W}_{st,isen}}$ $\dot{m}_w h_5 = \dot{W}_{st} - \dot{m}_w h_6$	$\dot{E}_{x_{D,ST}} = \dot{E}_{x_5} - \dot{E}_{x_6} - \dot{W}_{ST}$
کندانسور	$\dot{m}_6 h_6 = \dot{Q}_{cond} - \dot{m}_9 h_9$	$\dot{E}_{x_{D,GT}} = \dot{E}_{x_6} + \dot{E}_{x_7} - \dot{E}_{x_9} - \dot{E}_{x_8}$
پمپ	$\dot{m}_w h_9 + \dot{W}_{pump} = \dot{m}_w h_{10}$ $\eta_{Pump} = \frac{\dot{W}_{pump,isen}}{\dot{W}_{pump,act}}$	$\dot{E}_{x_{D,GT}} = \dot{E}_{x_9} - \dot{E}_{x_{10}} + \dot{W}_P$

هزینه خرید اواپراتور به صورت زیر براساس سطح اواپراتور تعیین می‌شود [33].

$$Z_{EVP}(\$) = 309.14 (A_{EVP})^{0.85} \quad (۲۰)$$

$$A_{EVP} = \frac{\dot{Q}_{EVP}}{U_{EVP} \Delta T \ln} \quad (۲۱)$$

هزینه خرید توربین تابعی از دمای ورودی توربین، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار و کار توربین است که می‌توان به شرح زیر عنوان نمود [32].

$$Z_{ST}(\$) = 3880.5 (\dot{W}_{ST})^{0.7} \left[1 + \left(\frac{0.05}{1 - \eta_{ST}}\right)^3 \right] \left\{ 1 + \exp\left[\frac{T_5 - 866}{10.42}\right] \right\}$$

$$C_{41} = 3880.5 \left(\frac{\$}{kg/s}\right)$$

برای محاسبه هزینه خرید کندانسور می‌توان از روابط زیر استفاده نمود [33].

$$Z_{cond}(\$) = 280.74 \frac{\dot{Q}_{cond}}{k \Delta T \ln} + 746 \dot{m}_{CW}, k = 2200$$

که \dot{m}_{CW} دبی جرمی آب سرد و $\Delta T \ln$ نیز اختلاف دمای لگاریتمی

$$y_{Ar} = x_{Ar}, \quad \lambda = \frac{n_f}{n_{air}}$$

$$y_{O_2} = x_{O_2} - \lambda x_1 - \frac{\lambda y_1}{4} - \frac{y_{CO}}{2} - \frac{y_{NO}}{2} \quad (۹)$$

با توجه به این که در سیستم تولید چنگانه با محرک اولیه میکروتوربین، واکنش احتراق صورت می‌گیرد و ترکیبات گاز حاصل از احتراق با حالت مرجع متفاوت است، بنابراین انرژی شیمیایی گازهای حاصل را می‌توان به صورت زیر تعیین نمود:

$$\bar{e}x_{ch} = \sum x_k \bar{e}x_{ch}^k + RT_0 \sum x_k \ln(x_k) \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق، x_k کسر مولی هر جزء است که با رابطه ۸ محاسبه می‌شود. $\bar{e}x_{ch}^k$ نیز انرژی شیمیایی استاندارد مولی است. نرخ اتلاف انرژی برای محفظه احتراق تابعی از انرژی سوخت بوده و به صورت زیر است [4]:

$$\dot{E}_{x_{D,CC}} = \dot{E}_{x_2} + \dot{E}_{x_f} - \dot{E}_{x_3} \quad (۱۱)$$

هزینه خرید محفظه احتراق به صورت تابعی از دبی جرمی هوای ورودی به محفظه احتراق، دما ورودی توربین گاز تعریف می‌شود که برابر است با:

$$Z_{CC}(\$) = 28.98 \dot{m}_{air} \left\{ 1 + \exp[0.015(T_3 - 1540)] \right\} \frac{1}{0.995 - \frac{P_3}{P_2}} \quad (۱۲)$$

$$Z_{CC}(\$) = 28.98 \dot{m}_{air} \left\{ 1 + \exp[0.015(T_3 - 1540)] \right\} \frac{1}{0.995 - \frac{P_3}{P_2}}$$

جدول ۱) درصد مولی اجزای به‌کاررفته به‌عنوان سوخت محفظه احتراق

مولفه	فرمول	درصد مولی
متان	CH ₄	۹۸/۴۳۲
اتان	C ₂ H ₆	۰/۶۷۱
کربن دی‌اکسید	CO ₂	۰/۱۳۳
نیتروژن	N ₂	۰/۴۸
اکسیژن	O ₂	۰
پروپان	C ₃ H ₈	۰/۰۷
سایر	---	۰/۲۱۴

توربین گاز: دمای خروجی توربین گاز را می‌توان به صورت تابعی از راندمان ایزنتروپیک توربین گاز (η_{GT})، دمای ورودی توربین گاز (T_3) و نسبت فشار توربین گاز ($\frac{P_3}{P_4}$) به صورت زیر بیان نمود [5]:

$$T_4 = T_3 \times \left(1 - \eta_{GT} \left(1 - \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} \right) \right) \quad (۱۳)$$

توان خروجی توربین گاز نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m}_g C_{pg} (T_3 - T_4) \quad (۱۴)$$

دبی جرمی توربین گاز است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_f + \dot{m}_a \quad (۱۵)$$

توان خالص خروجی توربین گاز برابر است با:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} - \dot{W}_{AC} \quad (۱۶)$$

و C_{pg} را می‌توان به عنوان تابعی از دما به صورت زیر در نظر گرفت [32]:

می‌توان با استفاده از معادله انرژی برای حجم کنترل اطراف اواپراتور محاسبه نمود. برای سیستم سرمایش جذبی به دلیل این که محلول آب و لیتیمومبرماید ایده‌آل نیست، از رابطه زیر برای محاسبه انرژی شیمیایی استفاده می‌شود [28]:

$$\bar{e}x_{ch} = \left(\frac{1}{\bar{M}_{sol}} \right) \left[\sum_{i=1}^n y_i \bar{e}x_{ch}^k + \bar{R}T_0 \sum_{i=1}^n y_i \ln(a_i) \right] \quad (29)$$

با بسط این معادله برای محلول آب- لیتیمومبرماید به دست می‌آید:

$$\bar{e}x_{ch} = \left(\frac{1}{\bar{M}_{sol}} \right) \left[y_{H_2O} \bar{e}x_{H_2O}^0 + y_{LiBr} \bar{e}x_{LiBr}^0 + \bar{R}T_0 \left(y_{H_2O} \ln(a_{H_2O}) + y_{LiBr} \ln(a_{LiBr}) \right) \right] \quad (30)$$

در رابطه فوق، a_{H_2O} معرف میزان واکنش‌پذیری آب است که به صورت نسبت فشار بخار آب در مخلوط به فشار بخار آب خالص تعریف می‌شود. واکنش‌پذیری a_{LiBr} نیز به صورت نسبت فشار بخار لیتیمومبرماید در مخلوط به فشار بخار لیتیمومبرماید تعریف می‌شود. این معادله شامل دو قسمت انرژی شیمیایی استاندارد نوع خالص و انرژی ناشی از فرآیند تجزیه است که به ترتیب توسط روابط ۳۱ و ۳۲ تعریف می‌شوند [1].

$$\bar{e}x_{ch} = \left(\frac{1}{\bar{M}_{sol}} \right) \left[y_{H_2O} \bar{e}x_{H_2O}^0 + y_{LiBr} \bar{e}x_{LiBr}^0 \right] \quad (31)$$

$$\bar{e}x_{ch,dis} = \left(\frac{\bar{R}T_0}{\bar{M}_{sol}} \right) \left[\left(y_{H_2O} \ln(a_{H_2O}) + y_{LiBr} \ln(a_{LiBr}) \right) \right] \quad (32)$$

که y_i کسر مولی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y_{H_2O} = \frac{(1-x_{1w})\bar{M}_{LiBr}}{\left((1-x_{1w})\bar{M}_{LiBr} + x_{1w}\bar{M}_{H_2O} \right)}, \quad (33)$$

$$y_{LiBr} = 1 - y_{H_2O}, x_{1w} = \frac{x_{LiBr}}{100}$$

که x_{LiBr} درصد غلظت محلول در آب و لیتیمومبرماید است و \bar{M}_{LiBr} و \bar{M}_{H_2O} به ترتیب برابر $۸۶/۶۵ \text{ kg/kmol}$ و $۱۸/۰۲ \text{ kg/kmol}$ است. برای محاسبه انرژی شیمیایی لیتیمومبرماید نیز رابطه زیر قابل استفاده است [34]:

$$\bar{e}x_{ch}^0 = \Delta \bar{g}_f^0 + \sum_{i=1}^n \bar{e}x_{ch,i}^0, \quad (34)$$

$$Li + \frac{1}{2} Br_2 \rightarrow LiBr, \bar{e}x_{ch,LiBr}^0 = \Delta \bar{g}_{f,LiBr}^0 + \bar{e}x_{ch,Li}^0 + \bar{e}x_{ch,Br_2}^0,$$

$$\Delta \bar{g}_{f,LiBr}^0 = -324 \frac{kJ}{mol}$$

۳-۴- واحد آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس

دستگاه آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در این سیستم شامل پمپ RO، توربین و واحد اسمز معکوس استاندارد است. در واقع کار اصلی تصفیه توسط این قسمت انجام می‌شود که شامل پوسته و ممبران‌هایی از جنس پلی‌آمید و پلی‌استر و غیره است که مطابق فرضیات انجام شده در یک پژوهش [22] در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی واحد آب‌شیرین‌کن RO، موازنه انرژی و جرم به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته شده است:

است. هزینه خرید پمپ نیز طبق رابطه زیر قابل محاسبه است [33]:

$$Z_{pump}(\$) = 705.48 (\dot{m}_{gas})^{0.71} \left(1 + \frac{0.2}{1-\eta_p} \right) \quad (24)$$

۳-۳ سیکل چیلر جذبی و آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس

با اعمال اصل بقای جرم و قوانین اول و دوم ترمودینامیک روی هر یک از اجزای چیلر جذبی، معادلات حاکم بر جرم کلی و هر جزء از محلول در حالت پایدار و جریان پایا به صورت زیر بیان می‌شود [27]:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o, \quad \sum (\dot{m}x)_i = \sum (\dot{m}x)_o \quad (25)$$

\dot{m} دبی جرمی سیال کاری و x غلظت جرمی لیتیمومبرماید (Li-Br) در محلول است. برای هر یک از مولفه‌های سیستم جذبی، معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o h_o - \sum \dot{m}_i h_i \quad (26)$$

بار سرمایش چیلر جذبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}(h_{23} - h_{24}) \quad (27)$$

چیلر جذبی مورد مطالعه در این مقاله شامل ایزوربر، پمپ، اواپراتور، شیر انبساط، ژنراتور، کندانسور و مبدل حرارتی است. آنالیز ترمودینامیک و انرژی هر یک از بخش‌های این سیستم در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ آنالیز انرژی و انرژی سیستم چیلر جذبی

اجزا	آنالیز ترمودینامیک	آنالیز انرژی
ایزوربر	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21} + \dot{m}_{15}$ و $\dot{m}_{21}x_{21} = \dot{m}_{20}x_{20}$ $\dot{m}_{21}h_{21} + \dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{23}h_{23}$, $\dot{Q}_{cooling} = \dot{m}_{26}(h_{26} - h_{27})$	$\dot{E}_{x,D,E,Abs} = \dot{E}_{x_{15}} + \dot{E}_{x_{21}} - \dot{E}_{x_{20}}$
پمپ	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{22}$, $\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{22})$	$\dot{E}_{x,D,E,Pump} = \dot{E}_{x_{20}} + \dot{W}_{pump} - \dot{E}_{x_{22}}$
شیر انبساط	$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23}$ و $h_{21} = h_{23}$ $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$ و $h_{13} = h_{14}$	$\dot{E}_{x,D,E,evalve} = \dot{E}_{x_{23}} + \dot{E}_{x_{13}} - \dot{E}_{x_{14}} - \dot{E}_{x_{21}}$
مبدل حرارتی	$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{24}$ و $\dot{m}_{23} = \dot{m}_{25}$ $x_{22} = x_{24}$ و $x_{23} = x_{25}$ $\dot{m}_{22}h_{22} + \dot{m}_{25}h_{25} = \dot{m}_{24}h_{24} + \dot{m}_{23}h_{23}$	$\dot{E}_{x,D,E,Hexch} = \dot{E}_{x_{22}} + \dot{E}_{x_{25}} - \dot{E}_{x_{24}} - \dot{E}_{x_{23}}$
کندانسور	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$ و $\dot{m}_{12}h_{12} = \dot{m}_{13}h_{13} + \dot{Q}_{cond}$	$\dot{E}_{x,D,E,Cond} = \dot{E}_{x_{12}} + \dot{E}_{x_{35}} - \dot{E}_{x_{13}} - \dot{E}_{x_{36}}$
اواپراتور	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{15}$ $\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{14}h_{14} - \dot{m}_{15}h_{15}$, $h_{15} = h(T_{evap}, x = 1)$	$\dot{E}_{x,D,E,Evap} = \dot{E}_{x_{14}} + \dot{E}_{x_{16}} - \dot{E}_{x_{15}} - \dot{E}_{x_{17}}$
ژنراتور	$\dot{m}_{11} + \dot{m}_{24} = \dot{m}_{26} + \dot{m}_{25}$ و $\dot{m}_{16}x_{16} = \dot{m}_{15}x_{15}$ $\dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{26}h_{26} = \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_{24}h_{24}$, $h_{12} = h(P_1, x = 1)$	$\dot{E}_{x,D,E,Gen} = \dot{E}_{x_{11}} + \dot{E}_{x_{24}} - \dot{E}_{x_{12}} - \dot{E}_{x_{25}} - \dot{E}_{x_{26}}$

هزینه خرید چیلر جذبی تابعی از تمام پارامترهای طراحی چیلر است که می‌توان آن را مترامک کرد و تقریب زد و تابعی از بار سرمایش چیلر را به صورت زیر در نظر گرفت [27]:

$$Z_{chiller}(\$) = (\dot{Q}_{Evap})^{0.67} \quad (28)$$

در رابطه فوق \dot{Q}_{Evap} بار سرمایشی چیلر جذبی به کیلووات است که

تحلیل انرژی و بهینه‌سازی چندهدفه یک سیستم تولید چندانگانه بر پایه میکروتوربین ۳۵۳
 سوخت به‌منظور عرضه به سیستم تعریف می‌شود. در ادامه راندمان انرژی برای سیستم تولید توان، سیستم تولید حرارت، توان و سیستم‌های تولید چندانگانه آمده است [22]:

$$\eta_{Power} = \frac{W_{net,GT}}{\dot{m}_f LHV_f}, \eta_{CHP} = \frac{W_{net,GT} + \dot{Q}_{heating}}{\dot{m}_f LHV_f} \quad (44)$$

$$\eta_{multi} = \frac{1}{\dot{m}_f LHV_f} (\dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} + \dot{W}_{net,ORC} + \dot{Q}_{heating} + \dot{Q}_{cooling,chiller} + \dot{Q}_{cooling,ORC} + \dot{m}_{HW} h_{HW} + \dot{m}_{FW} h_{FW}) \quad (45)$$

در رابطه فوق، LHV_f نشان‌دهنده ارزش حرارتی پایین سوخت بوده که در این مطالعه $LHV_f = 50000 \text{ kg/kg}$ در نظر گرفته شده است. \dot{m}_f دبی جرمی سوخت ورودی به محفظه احتراق و $\dot{W}_{net,GT}$ و $\dot{W}_{net,ST}$ و $\dot{W}_{net,ORC}$ به ترتیب نشان‌دهنده توان خروجی سیکل توربین گاز، سیکل بخار و سیکل ORC است. همچنین $\dot{Q}_{heating}$ و $\dot{Q}_{cooling,chiller}$ و $\dot{Q}_{cooling,ORC}$ نشان‌دهنده بار گرمایشی سیستم تولید چندانگانه، بار سرمایشی چلیر و بار سرمایشی ORC و ترم $\dot{m}_{HW} h_{HW}$ نیز بیانگر محصولات آب گرم است.

۳-۶- راندمان انرژی سیستم با محرک میکروتوربین

راندمان انرژی به صورت نسبت انرژی خروجی به انرژی ورودی تعریف می‌شود. برای توربین گاز، سیستم تولید حرارت، توان و سیستم تولید چندانگانه، راندمان انرژی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Psi_{power} = \frac{W_{net,GT}}{\dot{E}_{x,f}}, \Psi_{CHP} = \frac{W_{net,GT} + \dot{E}_{x,heating}}{\dot{E}_{x,f}} \quad (46)$$

$$\Psi_{multi} = \frac{1}{\dot{E}_{x,f}} (\dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} + \dot{W}_{net,ORC} + \dot{E}_{x,heating} + \dot{E}_{x,cooling,chiller} + \dot{E}_{x,cooling,ORC} + \dot{E}_{x,HW} + \dot{E}_{x,FW}) \quad (47)$$

$$\dot{E}_{x,heating} = \dot{Q}_{cond} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right), \quad \dot{E}_{x,cooling} = \dot{Q}_{cooling} \left(\frac{T_0 - T_{Evap}}{T_{Evap}} \right) \quad (48)$$

۳-۷- مدل‌سازی سیستم تولید چندانگانه با محرک میکروتوربین

در این مقاله با حفظ کلیت مساله، فرضیات زیر برای ساده‌سازی سیستم در نظر گرفته شده است:

- ۱- همه فرایندها در حالت پایدار رخ می‌دهند.
 - ۲- به دلیل دمای بالا و فشار پایین محصولات احتراق و هوا گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند.
 - ۳- اتلاف حرارتی از محفظه احتراق ۲٪ ارزش حرارتی سوخت در نظر گرفته شده و برای بقیه اجزا ادیاباتیکی است.
 - ۴- دمای نقاط پینچ ۱۰°C فرض شده است.
- برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توربین گازی سیستم تولید چندانگانه، مقادیر پارامترهای ورودی همانند جدول ۴ در نظر گرفته شده‌اند.

(۳۵)

$$\dot{W}_{net} = b_n (\dot{W}_{pump} - \dot{W}_{turbine}), \dot{W}_{pump} = \frac{\Delta P \dot{m}_{30}}{\eta_{pump} \rho_{30}}, \quad \dot{W}_{turbine} = \frac{\Delta P \dot{m}_{32} \eta_{turbine}}{\rho_{32}}$$

در اینجا، b_n تعداد پوسته‌های مورد استفاده در سیستم بوده که در این پژوهش ۷ در نظر گرفته شده است. پارامترهای \dot{W}_{pump} و $\dot{W}_{turbine}$ نیز به ترتیب کار مورد نیاز پمپ و توربین آبی سیستم آب‌شیرین‌کن هستند. در رابطه فوق، ΔP فشار غشا است و η_{pump} و $\eta_{turbine}$ راندمان ایزونتروپیک توربین آبی و پمپ هستند. دبی جرمی آب آشامیدنی تولیدشده (\dot{m}_{34}) را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود. RR نیز بیانگر نرخ بازیافت آب شور است.

$$\dot{m}_{34} = \frac{\dot{m}_{30}}{RR} \quad (36)$$

فشار عبوری از غشا را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\Delta P = J_w k_m + \Delta \pi, J_w = \frac{\dot{m}_{34}}{\rho_{34} n A} \quad (37)$$

k_m مقاومت نفوذپذیری غشا بوده که برابر با $8.03 \times 10^{-11} \frac{m^2 s}{kgPa}$ است و J_w نسبت جریان حجمی آب نفوذی و n معرف تعداد کل غشاهای مورد استفاده بوده که در این سیستم ۶۰ فرض شده و ρ_{34} دانسیته آب آشامیدنی و A مساحت غشا است. $\Delta \pi$ فشار اسمزی عبوری از پوسته بوده که برابر است با:

$$\Delta \pi = 805.1 \times 10^5 C_W R, C_W = \frac{e \left(\frac{J_w}{k} \right)_{x_{12}}}{e \left(\frac{J_w}{k} \right)_{(1-R)+R}} \quad (38)$$

C_W غلظت دیواره غشا و R ضریب بازگشت پوسته بوده که برابر با ۰/۹۹۷۵ در نظر گرفته شده است [34]. پارامتر k نیز معرف ضریب انتقال جرم بوده که به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$k = 0.04 Re^{0.75} Sc^{0.33} \frac{D_s}{d} \text{ و } SC = \frac{\mu}{\rho D_s} \quad (39)$$

در رابطه فوق، D_s و d به ترتیب معرف نفوذ و ضخامت کانال تغذیه بوده که مقدار هر یک به ترتیب $1.0/15 \text{ m}^2/s$ و $0.7/1 \text{ میلی‌متر}$ در نظر گرفته شده است. Re نیز عدد رینولدز آب در نقطه ۳۰ و SC بیانگر عدد اسمیت است.

نرخ اتلاف انرژی برای اجزای واحد آب‌شیرین‌کن شامل پمپ RO، توربین RO و واحد اسمز معکوس را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\dot{E}_{x,D,RO Pump} = \dot{E}_{x,30} + \dot{W}_{pump} - \dot{E}_{x,31} \quad (40)$$

$$\dot{E}_{x,D,RO} = \dot{E}_{x,31} - \dot{E}_{x,32} - \dot{E}_{x,34} \quad (41)$$

$$\dot{E}_{x,D,RO Turbin} = \dot{E}_{x,32} - \dot{W}_{turbine} - \dot{E}_{x,33} \quad (42)$$

تابع هزینه واحد آب‌شیرین‌کن RO را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [34]:

$$Z_{RO} (\$) = 0.98 m^3 \quad (43)$$

در رابطه فوق، m جرم آب به کیلوگرم است.

۳-۵- راندمان انرژی سیستم با محرک میکروتوربین

بر اساس قانون اول، راندمان به صورت نسبت انرژی مفید تولیدشده به وسیله سیستم (سرمایش، گرمایش و توان) به انرژی ورودی از

پارامتر سیستم	مقدار	پارامتر سیستم	مقدار
فشار کندانسور (کیلو پاسکال)	۱۰	دمای اواپراتور چیلر (°C)	۵
راندمان ایزنتروپیک پمپ	۰/۷۸	نسبت فشار در کمپرسور	۱۰
راندمان ایزنتروپیک توربین	۰/۸	راندمان ایزنتروپیک کمپرسور	۰/۸۳
دمای نقطه پینچ (°C)	۱۰	فشار ورودی توربین ORC (کیلو پاسکال)	۷۰۰
فشار در کندانسور ORC (کیلو پاسکال)	۹۰	غلظت محلول در چیلر	۵۸±۰/۳
فشار اواپراتور ORC (کیلو پاسکال)	۲۵	-	-

۴- نتایج مدل سازی سیستم تولید چندانگانه با محرک میکروتوربین

سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین به سیکل توربین گاز (برایتون)، سیکل رنگین با HRSG فشار دوگانه، چیلر جذبی تک منظوره، سیکل رنگین ایده آل (ORC) و آبگرمکن کویل دار تقسیم شده است. سوخت تزریقی به محفظه، احتراق گاز طبیعی در نظر گرفته شده است.

با استفاده از آنالیز ترمودینامیک انجام شده برای سیستم میکروتوربین، همچنین پارامترهای ورودی ذکر شده در جدول ۴، جدول ۵ خواص ترمودینامیک سیستم را اعم از بارهای سرمایشی و گرمایشی، توان تولید شده توسط توربین، آب گرم و آب آشامیدنی را نشان می دهد.

جدول ۵) پارامترهای خروجی سیستم میکروتوربین

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
بار سرمایشی (کیلو وات)	۱۲۶۲	راندمان انرژی	۵۹
بار گرمایشی (کیلووات)	۵۷۸۸	راندمان انرژی سیستم	۶۱
توان خروجی (کیلووات)	۱۱۰۳۸	نرخ اتلاف انرژی کل (کیلووات)	۱۹۶۰۰
دبی جرمی سوخت (kg/s)	۰/۶۴	نرخ هزینه کل سیستم (\$/h)	۱۰۹۰
دبی جرمی آب آشامیدنی (kg/s)	۶/۸	هزینه اثرات زیست محیطی (\$/h)	۶۷/۶
دبی جرمی آب گرم (kg/s)	۳/۵۸	میزان انتشار دی اکسید کربن (kg/kwh)	۱۳۲
Cop چیلر جذبی	۰/۴۴	-	-

۴-۱- نتایج آنالیز اقتصادی و انرژی

به منظور درک بهتر عملکرد سیستم، میزان اتلاف انرژی اجزای مختلف سیستم میکروتوربین در نمودار ۱ آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، بیشترین میزان اتلاف انرژی مربوط به محفظه احتراق بوده که علت آن بازگشت ناپذیری واکنش احتراق و تفاوت زیاد بین دمای هوای ورودی به محفظه و دمای شعله است. همچنین به علت اختلاف دمای بین دو جریان سیال عبوری در کندانسور و افت فشار ایجاد شده در این وسیله، کندانسور نیز در رتبه بعدی قرار گرفته است. سیکل جذبی به دلیل این که از انرژی سوخت به صورت مستقیم استفاده نمی کند، اتلاف انرژی قابل ملاحظه ای ندارد.

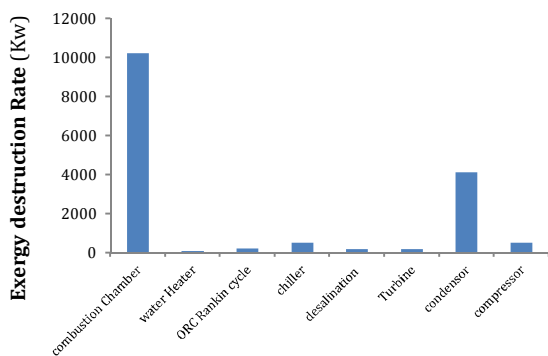
در نمودار ۲، تاثیر تغییرات بار سرمایشی و گرمایشی نسبت به افزایش نسبت فشار کمپرسور بررسی شده است. همان طور که از نمودار مشاهده قابل مشاهده است، بار سرمایشی و گرمایشی سیستم با افزایش نسبت فشار کمپرسور کاهش می یابد. چرا که افزایش نسبت فشار، منجر به کاهش دما و دبی خروجی توربین گاز می شود که این خود منجر به کاهش انرژی ورودی به سیکل چیلر

جذبی و سیستم رنگین خواهد شد. در نتیجه بار سرمایشی و گرمایشی سیستم کاهش می یابد.

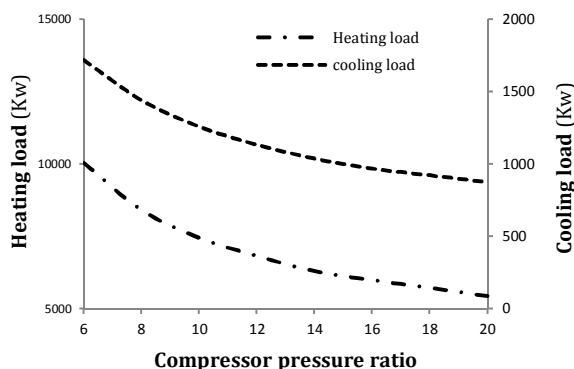
نمودار ۳، تاثیر تغییرات راندمان انرژی نسبت به افزایش نسبت فشار کمپرسور را نشان می دهد. با توجه به نمودار می توان مشاهده کرد که با افزایش نسبت فشار کمپرسور، راندمان انرژی سیستم تولید چندانگانه نیز افزایش می یابد. در این نمودار نرخ اتلاف انرژی بر حسب نسبت فشار کمپرسور نشان داده شده است.

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر راندمان و هزینه کلی سیستم، دمای ورودی به توربین گاز است. طبق رابطه ۱ با افزایش دمای ورودی توربین، با فرض ثابت بودن بقیه پارامترها، دمای خروجی توربین نیز افزایش می یابد. دمای خروجی توربین منجر به افزایش انرژی ورودی برای تولید بار سرمایشی و گرمایشی می شود، بنابراین با افزایش دمای ورودی توربین، منجر به افزایش بار سرمایشی و گرمایشی سیستم خواهد شد. همچنین راندمان انرژی نیز به علت افزایش توان خالص خروجی افزایش می یابد. نمودارهای ۴ و ۵ به ترتیب روند تغییرات راندمان انرژی و تغییرات بار سرمایشی و گرمایشی را بر حسب دمای ورودی توربین نشان می دهند.

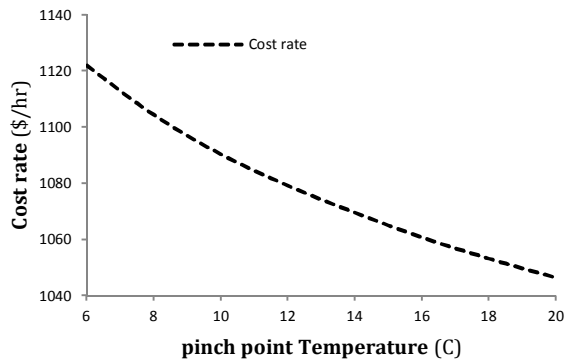
دمای نقطه پینچ یکی دیگر از پارامترهای تصمیم گیری در سیستم های تولید چندانگانه بر پایه توربین است. در نمودارهای ۶ و ۷ تغییرات راندمان انرژی و هزینه کلی سیستم بر حسب این پارامتر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش این دما، راندمان انرژی سیستم کاهش می یابد. همچنین به دلیل کاهش سطح انتقال حرارت ژنراتور بخار، هزینه کلی سیستم افزایش می یابد.



نمودار ۱) نرخ تخریب انرژی اجزای مختلف سیستم تولید چندانگانه



نمودار ۲) تغییرات بار گرمایشی و سرمایشی سیستم بر حسب نسبت فشار کمپرسور



نمودار ۷) تغییرات نرخ هزینه کلی سیستم بر حسب تغییرات دمای پینچ

۲-۴- تعریف توابع هدف

برای ارزیابی دقیق سیستم و تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد ترمودینامیک و اقتصادی، راندمان اگزرژی و نرخ هزینه تمام شده سیستم به عنوان دو تابع در نظر گرفته شده‌اند. این توابع هدف به ترتیب به صورت روابط ۴۹ و ۵۰ آورده شده‌اند. هزینه خسارت آلودگی به طور مستقیم به هزینه‌هایی که باید پرداخت شود، اضافه می‌شود. تابع هدف دوم نیز با جمع اهداف ترمودینامیک و زیست‌محیطی حاصل می‌شود. در نتیجه تابع هدف در این آنالیز را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

راندمان اگزرژی

(۴۹)

$$\Psi_{multi} = \frac{1}{\dot{E}_{x,f}} (\dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} + W_{net,ORC} + \dot{E}_{x,heating} + \dot{E}_{x,cooling,chiller} + \dot{E}_{x,HW} + \dot{E}_{x,FW})$$

نرخ هزینه کلی: نرخ هزینه کلی سیستم تابعی از هزینه اجزای سیستم، نرخ هزینه اثرات زیست‌محیطی و سوخت است [34].

(۵۰)

$$\dot{C}_{tot} = \sum_k \dot{Z}_k + \dot{C}_f + \dot{C}_{env}$$

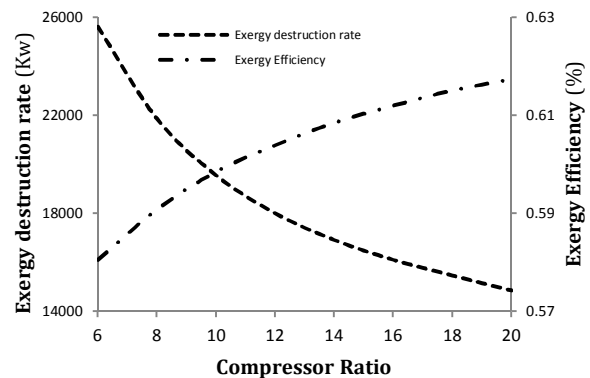
$$\dot{C}_f = c_f \dot{m}_f LHV,$$

$$\dot{C}_{env} = C_{CO} \dot{m}_{CO} + C_{NO_2} \dot{m}_{NO_2} + C_{CO_2} \dot{m}_{CO_2}$$

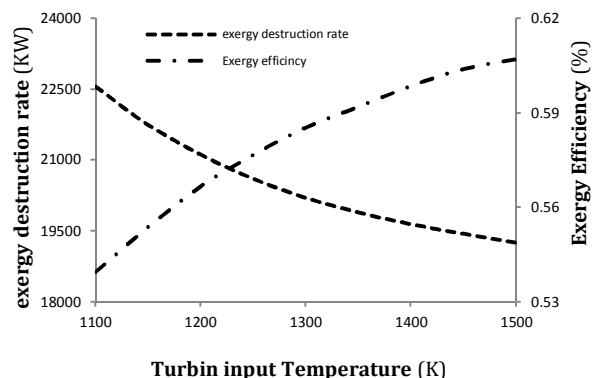
در رابطه فوق، c_f هزینه سوخت مصرفی بوده که در این مطالعه برابر با ۰/۱\$/kWh در نظر گرفته شده است. همچنین $C_{CO} = 0.0208\$/kg$, $C_{NOx} = 6.853\$/kg$, $C_{CO_2} = 0.024\$/kg$ است [34]. اثرات زیست‌محیطی نیز به صورت نرخ هزینه کلی خسارت آلودگی (\$/s) بر اساس انتشار مونوکسیدکربن، اکسید نیتروژن و دی‌اکسیدکربن (گازهای گلخانه‌ای) با ضرب دبی جرمی هر یک در هزینه آلودگی مرتبط با آن در نظر گرفته و به دیگر هزینه‌های سیستم اضافه شده است.

۳-۴- پارامترهای طراحی

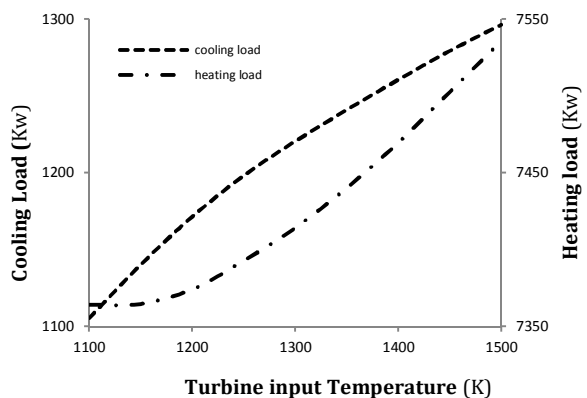
در این مقاله با توجه به تحلیل پارامتریک سیستم، پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سیستم که به عنوان پارامترهای طراحی انتخاب شده‌اند، عبارت از نسبت فشار کمپرسور (r_{AC})، راندمان ایزنتروپیک کمپرسور (η_{AC})، راندمان ایزنتروپیک توربین گاز (η_{GT})، دمای ورودی توربین گاز ($T_{G,Turbine}$)، اختلاف دمای نقطه پینچ (T_{PP})، راندمان ایزنتروپیک توربین بخار (η_{ST})، راندمان ایزنتروپیک پمپ (η_{pump})، فشار کندانسور (P_{cond})، دمای اواپراتور چیلر جذبی (T_{EVP})، فشار ورودی توربین ORC ($P_{Tur,ORC}$) و فشار اواپراتور ORC ($P_{EVP,ORC}$) هستند. جدول ۶



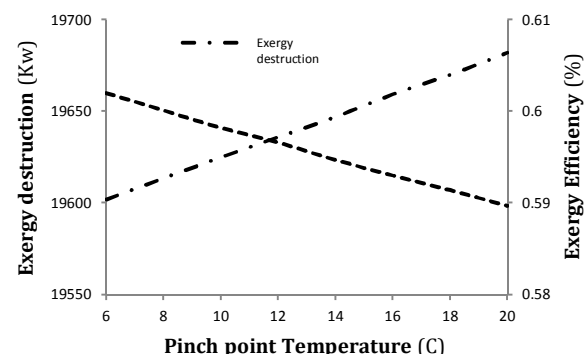
نمودار ۳) تغییرات راندمان و نرخ تخریب اگزرژی سیستم بر حسب نسبت فشار کمپرسور



نمودار ۴) تغییرات راندمان و نرخ تخریب اگزرژی سیستم بر حسب دمای ورودی توربین



نمودار ۵) تغییرات بار سرمایشی و گرمایشی سیستم بر حسب دمای ورودی توربین



نمودار ۶) تغییرات راندمان اگزرژی و نرخ اتلاف اگزرژی سیستم بر حسب تغییرات دمای پینچ

باید علاوه بر داشتن سرعت همگرایی مناسب، قابلیت همگرایی به بهینه سراسری را نیز داشته باشد. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب برای طراحی بهینه پارامترهای سیستم تولید چندگانه استفاده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که رفتار اجتماعی کرم شبتاب را شبیه‌سازی می‌کند. کرم‌های شبتاب نورهای تولید می‌کنند که الگوی نوری هر کدام با دیگری متفاوت است. از این نور به دو منظور جذب جفت و شکار طعمه استفاده می‌شود. در الگوریتم کرم شبتاب، دو موضوع مهم تغییرات شدت نور و فرمول‌بندی جذابیت وجود دارد. در حالت کلی فرض می‌شود که شدت نور ساطع شده توسط کرم شبتاب، رابطه مستقیمی با جذابیت آن دارد. با در نظر گرفتن میزان نور هر کرم به عنوان مقدار تابع هدف می‌توان رفتار کرم‌های شبتاب را به صورت یک الگوریتم بهینه‌سازی مدل نمود. برای سادگی در فرآیند مدل‌سازی رفتار اجتماعی کرم شبتاب، سه فرض اساسی زیر در نظر گرفته می‌شود [36]:

۱- کرم‌های شبتاب همگی تک‌جنسیتی هستند. بنابراین جنسیت نقشی در جذب آنها به سمت یکدیگر ندارد.

۲- میزان جذب بین دو کرم شبتاب با درخشندگی آنها نسبت مستقیم و با فاصله بین آنها نسبت عکس دارد. بنابراین کرم شبتاب درخشنده‌تر، سایر کرم‌های شبتاب موجود در همسایگی را به سمت خود جذب می‌کند.

۳- میزان درخشندگی کرم‌های شبتاب وابسته به مقدار تابع هدفی است که بهینه می‌شود. در صورتی که تابع هدف می‌بایست ماکزیمم شود، میزان درخشندگی می‌تواند متناسب با تابع هدف باشد و در صورت کمینه‌کردن تابع هدف می‌توان میزان درخشندگی را به گونه‌ای تعریف نمود که تابع هدف کوچک‌تر، متناظر با میزان درخشندگی بیشتر باشد.

در ساده‌ترین حالت برای مسایل بهینه‌سازی، درخشندگی I یک کرم شبتاب می‌تواند به صورت $I(x) \propto f(x)$ انتخاب شود که $f(x)$ مقدار برازندگی تابع هدف است. با توجه به این که میزان جذابیت کرم‌های شبتاب (β) نسبی بوده و وابسته به فاصله بین دو کرم شبتاب (r) و ضریب جذب نور (γ) است، می‌توان این جذابیت را به صورت زیر بیان نمود [36]:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (51)$$

در رابطه فوق β_0 میزان جذابیت کرم درخشان‌تر در $r = 0$ است. موقعیت کرم \bar{a} پس از حرکت به سمت کرم درخشان‌تر \bar{a} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$(52)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j(t) - x_i(t)) + \alpha$$

$$r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2}$$

در رابطه فوق $x_i(t)$ و $x_j(t)$ به ترتیب موقعیت کرم شبتاب کم‌نورتر و درخشان‌تر در مرحله تکرار t ام و α نیز عددی تصادفی در محدوده $[-0.5, 0.5]$ است.

جذب کرم‌های شبتاب تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی کرم‌ها به سمت درخشان‌ترین کرم موجود جذب شوند. این کرم در

جدول ۶) محدوده‌های مجاز پارامترهای طراحی سیستم [30]

محدودیت	علت	محدودیت	علت
$r_{Ac} < 22$	محدودیت تجاری	$\eta_{pump} < 0.9$	محدودیت تجاری
$\eta_{Ac} < 0.9$	محدودیت تجاری	$\eta_{ST} < 0.9$	محدودیت تجاری
$\eta_{GT} < 0.9$	محدودیت تجاری	$8 < P_{con} < 10$	محدودیت راندمان حرارتی
$T_{G,Tur} < 1277$	محدودیت دمای مواد سازنده	$2 < T_{EVP} < 6$	محدودیت در بار سرمایشی
$10 < T_{pp} < 22$	محدودیت دمای مواد سازنده	$20 < P_{EVP,ORC} < 35$	محدودیت در بار سرمایشی
-	-	$180 < P_{Tur,ORC} < 250$	محدودیت تجاری

۴-۴ نتایج اعتبارسنجی مدل

در جدول ۷ مقایسه بین نتایج حاصل از تحلیل اگزورزی نقاط مختلف سیستم مورد مطالعه با نتایج ذکر شده در یک مرجع [35] انجام شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل تطابق مناسبی با داده‌های تجربی دارند.

جدول ۷) اعتبارسنجی مقادیر حاصل از اگزورزی چیلر جذبی

نقاط	نتایج مرجع [35]	نتایج مقاله	درصد خطا
۱۲	۱۷۴/۹	۱۷۳/۹	۲/۱
۱۳	۵۱/۴۵	۵۰/۴۵	۱/۴
۱۴	۴۱/۸۶	۴۰/۸۶	۱/۸
۱۵	۱۳۱/۳-	۱۳۲/۳-	۳/۲
۲۰	۴۹۴/۳	۴۹۳/۳	۰/۴
۲۱	۵۹۳/۳	۵۹۴/۳	۱/۱
۲۲	۴۹۴/۵	۴۹۵/۵	۰/۲
۲۳	۵۹۵/۴	۵۹۶/۴	۰/۸
۲۴	۴۹۸/۴	۴۹۷/۴	۳/۶
۲۵	۶۰۴/۴	۶۰۵/۴	۲/۷

۵- الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب

در بحث بهینه‌سازی اگزورزی- اقتصادی سیستم‌های تولید چندگانه غالباً از روش‌های بهینه‌سازی عددی استفاده می‌شود. برای انجام این کار می‌توان هم از الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک و هم از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده کرد. الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک دارای دو اشکال عمده هستند. نخست این که عملکرد آنها شدیداً وابسته به حدس اولیه‌ای است که برای پارامترهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. به گونه‌ای که انتخاب نامناسب مقادیر اولیه این پارامترها می‌تواند منجر به واگراشدن الگوریتم شود. دوم این که در مسایل بهینه‌سازی با ابعاد بالا، سرعت همگرایی آنها به شدت کاهش می‌یابد و موجب گیرافتادن الگوریتم در نقاط بهینه محلی می‌شوند. به دلیل محدودیت‌های الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، غالباً برای حل این گونه مسایل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده می‌شود. در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید چندگانه به دلیل گسترده بودن فضای جست‌وجو و همچنین تعداد زیاد پارامترهای طراحی و بعضاً غیرخطی بودن ماهیت مساله، الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده

الگوریتم دچار همگرایی زودرس شود. از طرفی در صورتی که محدوده تغییرات پارامترهای طراحی خیلی بزرگ‌تر از محدوده تغییرات α باشد، اضافه شدن این ترم تاثیر محسوسی بر موقعیت بعدی کرم‌ها ندارد و لذا احتمال گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی افزایش می‌یابد. به بیانی دیگر در نسخه اصلی الگوریتم، از اولین تکرار تا زمان برآورده شدن شرط خاتمه، به مفهوم استخراج بیشتر از مفهوم اکتشاف توجه می‌شود. برای رفع این محدودیت با الهام از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی^[37]، رابطه ۵۲ را به شکل زیر اصلاح می‌کنیم:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \times (x_j(t) - x_i(t)) \quad (53)$$

$$+ F \times (x_{r1}(t) - x_{r2}(t)),$$

$$x_i \neq x_j \neq x_{r1} \neq x_{r2}$$

در رابطه فوق، x_{r1} و x_{r2} دو عضو دلخواه از جمعیت است و F نیز سرعت همگرایی الگوریتم را کنترل می‌کند. در مسایل بهینه‌سازی، مقدار پارامتر F غالباً در محدوده صفر تا دو انتخاب می‌شود. در این مقاله برای ایجاد تعادل بین خاصیت اکتشاف و استخراج از رابطه زیر برای محاسبه پارامتر F استفاده شده است:

$$F(t) = \left(F_{max} - (F_{max} - F_{min}) \frac{t}{Maxgen} \right) \quad (54)$$

در رابطه فوق، $Maxgen$ حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، F_{max} و F_{min} نیز بیانگر محدوده تغییرات F است.

طبق رابطه ۵۴ مشاهده می‌شود که برای ایجاد تعادل بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج در الگوریتم، پارامتر F به صورت خطی از یک مقدار بیشینه به یک مقدار کمینه کاهش می‌یابد، به طوری که در مراحل اولیه، الگوریتم سعی می‌کند در یک زمان معقول با وزن دادن بیشتر به جست‌وجوی تصادفی (مفهوم اکتشاف) باعث جست‌وجوی جامع‌تر فضای جواب شود و در تکرارهای پایانی با میل کردن F به سمت صفر، ترم $(x_j(t) - x_i(t)) \beta$ غالب شود و لذا یک جست‌وجوی محلی در همسایگی بهترین جواب‌ها انجام گیرد (مفهوم استخراج). با تکرار مراحل فوق به تدریج کرم‌ها به سمت جواب بهینه حرکت می‌کنند و در پایان اجرای الگوریتم، تقریباً تمامی جواب‌های مساله به جواب بهینه سراسری همگرا می‌شوند.

۵-۲- الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه (MOFLA)

الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب که در بخش قبل معرفی شد، الگوریتمی است که برای حل مسایل بهینه‌سازی تک‌هدفه کاربرد دارد، اما مساله مورد نظر در این پژوهش، از نوع مسایل بهینه‌سازی چندهدفه است. در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه، پیدا کردن یک جواب منحصر به فرد که بتواند به طور همزمان تمامی توابع هدف را بهینه نماید، معمولاً امکان‌پذیر نیست. با این حال می‌توان به مجموعه‌ای از جواب‌ها دست یافت که بهترین تعامل را بین اهداف برقرار کنند. به این مجموعه جواب‌ها، جواب‌های پارتو یا جبهه پارتو گفته می‌شود. جبهه پارتو در حقیقت همان جواب‌های بهینه‌ای است که توسط هیچ جواب دیگری از مجموعه جواب‌های دیگر مغلوب نمی‌شوند. تعریف ریاضی مغلوب بودن یک جواب به صورت زیر است^[37]:

در یک مساله بهینه‌سازی m هدفه $f_i, i=1,2,\dots,m$ می‌گوییم جواب x_1 ، جواب x_2 را مغلوب می‌کند اگر و تنها دو شرط زیر برقرار باشد:

واقع همان بهترین مقدار را برای تابع هدف ایجاد می‌کند. شبه کد الگوریتم کرم شب‌تاب در شکل ۲ آورده شده است^[36].

```

begin
Objective function  $f(x)$ 
Randomly initialize the population of fireflies  $x_i(t), i = 1, 2, \dots, n$ ,
Compute the fitness value of each firefly by  $f(x_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$  and  $\beta_0$ 
while ( $t < Maxgen$ )
for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
for  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies
if  $f(x_j(t)) > f(x_i(t))$ 
Move  $x_i$  towards  $x_j$  according to equation (52)
Calculate the fitness value of  $x_i(t)$  (new candidate solution);
end if
end for  $j$ 
end for  $i$ 
Rank the fireflies and find the current best
+ +  $t$ 
end while
end
    
```

شکل ۲) شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب^[36]

۵-۱- نسخه اصلاح شده الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب

در حالت کلی مهم‌ترین عاملی که باعث افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند در بهینه‌های محلی می‌شود، ایجاد مصالحه بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج است. مفهوم اکتشاف به الگوریتم این امکان را می‌دهد که بتواند برای دستیابی به پاسخ‌های جدید، فضای جواب مساله را با قابلیت بالا و بدون گیرافتادن در بهینه‌های محلی جست‌وجو نماید. به عبارت دیگر در یک الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند، اکتشاف به معنای توانایی الگوریتم در جست‌وجوی مناطق مختلف فضای جواب برای یافتن پاسخ‌های جدید است، در حالی که مفهوم استخراج باعث می‌شود تا الگوریتم بتواند مکان‌های بهینه را به صورت محلی و متمرکز برای یافتن بهترین جواب جست‌وجو نماید. به عبارت دیگر، استخراج به معنی قابلیت متمرکز کردن جست‌وجو در محدوده مطلوب است تا جواب مورد نظر موشکافی شود. بنابراین برای رسیدن به جواب بهینه سراسری باید تعادلی بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج صورت پذیرد. معمولاً یک راهکار موثر برای برقراری این تعادل آن است که در اولین تکرارهای الگوریتم، تاثیر مفهوم اکتشاف بیشتر از استخراج باشد و با گذشت زمان و تکرار الگوریتم از تاثیر مفهوم اکتشاف کاسته و اهمیت بیشتری به مفهوم استخراج داده شود. به این معنی که در تکرارهای اولیه، الگوریتم یک جست‌وجوی سراسری در فضای جواب انجام می‌دهد و پس از یافتن نواحی مطلوب، در تکرارهای آخر، ناحیه‌های یافته شده را با دقت بیشتری جست‌وجو کند.

طبق رابطه ۵۲، نسخه اصلی الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب دارای دو بخش اصلی است. یکی ترم $(x_j(t) - x_i(t)) \beta$ که وظیفه هدایت جواب‌ها به سمت جواب‌های بهتر (ویژگی استخراج) را بر عهده دارد و دیگری ترم α که یک ترم تصادفی است و می‌بایست باعث جست‌وجوی جامع‌تر فضای جواب مساله شود (ویژگی اکتشاف).

با توجه به این که محدوده تغییرات α بین $[0.5, -0.5]$ است، در مسایل بهینه‌سازی که محدوده تغییرات پارامترهای طراحی خیلی کوچک‌تر از محدوده فوق باشد، اضافه شدن این ترم باعث خواهد شد تا پارامترهای طراحی از محدوده اصلی خود خارج و لذا

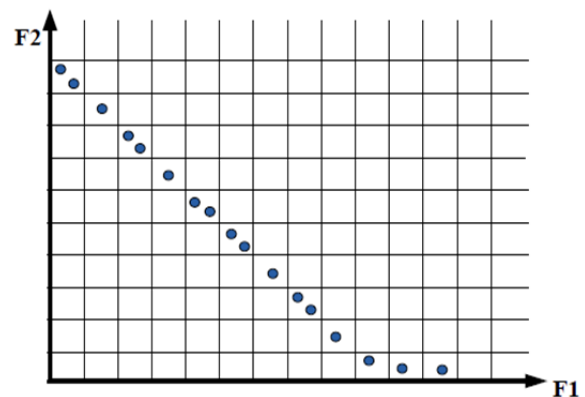
۱- به ازای تمامی f_i ها، $f_i(x_1)$ بدتر از $f_i(x_2)$ نباشد.

۲- حداقل به ازای یکی از f_i ها، $f_i(x_1)$ بهتر از $f_i(x_2)$ باشد.

اگر یکی از دو شرط فوق برقرار نباشد، می‌گوییم جواب x_1 ، جواب x_2 را مغلوب نمی‌کند. شایان ذکر است اگر جواب x_1 بر جواب x_2 غلبه نکند، لزوماً به معنی آن نیست که x_2 بر x_1 غلبه می‌کند. به مجموعه جواب‌هایی که توسط هیچ کدام از دیگر جواب‌ها مغلوب نشوند، جواب‌های بهینه به مفهوم پارتو (جبهه پارتو) می‌گوییم. در ادامه با استفاده از توضیحات ذکر شده در بالا، الگوریتم بهینه‌سازی تک‌هدفه معرفی شده در بخش قبل را به گونه‌ای تعمیم می‌دهیم که قابل استفاده برای حل مساله بهینه‌سازی چندهدفه نیز باشد.

برای این که الگوریتم جست‌وجوی کرم شب‌تاب بتواند در حل مسایل چندهدفه به کار رود، ابتدا مفهومی به نام لیست آرشیو معرفی می‌کنیم. لیست آرشیو لیستی است که جواب‌های بهینه به مفهوم پارتو در آن قرار می‌گیرند. در شروع الگوریتم این لیست خالی است و هیچ جوابی در آن قرار ندارد. بعد از اجرای اولین تکرار، تمامی جواب‌ها با هم مقایسه می‌شوند و جواب‌هایی که توسط هیچ یک از اعضای جمعیت مغلوب نشده‌اند به این لیست منتقل می‌شوند. در پایان هر تکرار، پس از به‌روز رسانی اعضای جمعیت، ابتدا تمامی اعضای جدید با هم مقایسه و اعضای نامغلوب به لیست آرشیو اضافه می‌شوند. با توجه به این که اعضای جدید منتقل شده به لیست آرشیو ممکن است توسط یک یا چند عضو قبلی لیست مغلوب شوند یا بالعکس تعدادی از اعضای قبلی لیست آرشیو، مغلوب این اعضای جدید شوند، باید پس از پایان هر تکرار و بعد از اضافه شدن اعضای جدید به لیست، لیست آرشیو مجدداً پالایش و اعضای مغلوب حذف شوند. این فرآیند تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم برآورده نشود، تکرار خواهد شد.

موضوع دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد آن بوده که چون ظرفیت لیست آرشیو معمولاً محدود است، اگر تعداد جواب‌های نامغلوب از ظرفیت آرشیو بیشتر شد، باید اعضای اضافی از لیست حذف شوند. بدین منظور ابتدا مطابق با شکل ۳، جبهه پارتو مش‌بندی (ناحیه‌بندی) می‌شود. جواب‌های موجود در ناحیه‌هایی برای حذف مقدم هستند که دارای تراکم بیشتری باشند یا به عبارتی شامل پاسخ‌های بیشتری هستند.



شکل ۳) جدول‌بندی اعضای موجود در لیست آرشیو

پس از شناسایی ناحیه‌ای که دارای بیشترین جواب است، برای

حذف جواب‌های ناحیه، از مفهوم فاصله ازدحامی استفاده می‌کنیم. فاصله ازدحامی مشخص می‌کند مقدار فاصله هر عضو موجود در لیست آرشیو با دو عضو مجاور خود (که آنها نیز در لیست آرشیو هستند) چقدر است. رابطه ریاضی فاصله ازدحامی عضو i ام به صورت زیر است [37, 38]:

$$CD_{im} = \frac{f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})}{f_m(x_{max}) - f_m(x_{min})} \quad (55)$$

$$i = 2, \dots, n - 1$$

$$CD_i = \sum_{m=1}^M CD_{im}$$

در رابطه فوق CD_{im} فاصله اقلیدسی i امین عضو در جهت تابع هدف m ام، $f_m(x_{max})$ و $f_m(x_{min})$ نیز به ترتیب مقدار ماکزیمم و مینیمم m امین تابع هدف به ازای i امین عضو است. CD_i فاصله ازدحامی i امین عضو است.

هر چه فاصله ازدحامی مربوط به یک عضو کوچک‌تر باشد، به معنی آن است که در مجاورت آن عضو، اعضای بهینه پارتو بیشتری وجود دارند و لذا حذف این عضو تاثیری بر کیفیت و گوناگونی جواب‌ها نخواهد داشت.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، در الگوریتم‌های بهینه‌سازی کرم شب‌تاب تک‌هدفه، کرم شب‌تاب درخشان‌تر، سایر کرم‌های شب‌تاب موجود در همسایگی را به سمت خود جذب می‌کند. به عبارت دیگر در صورتی که $x_j(t)$ بهتر از $x_i(t)$ باشد، موقعیت $x_i(t)$ باید طبق رابطه ۵۳ به‌روزرسانی شود. اما در حل مسایل بهینه‌سازی چندهدفه و در هر تکرار الگوریتم، وضعیت دو عضو $x_i(t)$ و $x_j(t)$ همواره یکی از سه حالت زیر است:

حالت اول: $x_i(t)$ مغلوب $x_j(t)$ می‌شود.

حالت دوم: $x_j(t)$ مغلوب $x_i(t)$ می‌شود.

حالت سوم: هیچ یک از دو عضو $x_i(t)$ و $x_j(t)$ بر یکدیگر غلبه نمی‌کنند.

برای حالت اول که $x_i(t)$ مغلوب $x_j(t)$ می‌شود، در نسخه چندهدفه الگوریتم فرض می‌کنیم که همانند نسخه تک‌هدفه موقعیت $x_i(t)$ توسط رابطه ۵۳ به‌روزرسانی شود. اما برای حالت‌های دوم و سوم از رابطه ۵۶ برای به‌روزرسانی موقعیت $x_i(t)$ استفاده می‌کنیم.

(۵۶)

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_{pareto}(t) - x_i(t)) + F \times (x_{r1}(t) - x_{r2}(t)),$$

$$x_i \neq x_{pareto} \neq x_{r1} \neq x_{r2}$$

در رابطه فوق، x_{pareto} یکی از اعضای بهینه موجود در لیست آرشیو است که به صورت تصادفی از لیست انتخاب می‌شود. با توجه به رابطه فوق مشاهده می‌شود که برای حالت‌های دوم و سوم نیز عضو $x_i(t)$ به سمت عضوهای با درخشندگی بیشتر (یا همان عضوهای بهتر)، جذب خواهد شد. این امر باعث جست‌وجوی دقیق‌تر در همسایگی جبهه پارتو می‌شود و سرعت همگرایی به سمت جواب‌های بهینه سراسری را افزایش خواهد داد. شبه کد نسخه پیشنهادی الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$N_p = 250, \quad Maxgen = 300, \quad \beta_0(0) = 1$$

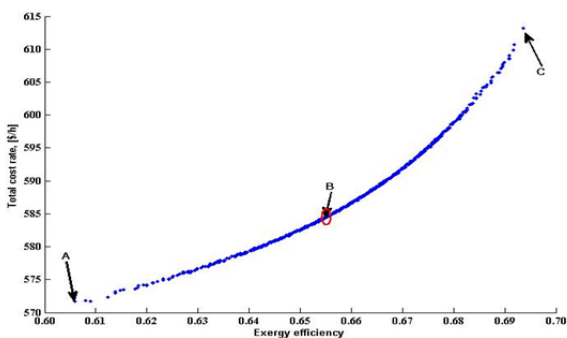
$$\gamma = 0.8, F_{min} = 0.1, F_{max} = 2$$

در رابطه فوق N_p تعداد اعضای جمعیت و $Maxgen$ حداکثر تعداد تکرار یا همان شرط خاتمه الگوریتم است. ظرفیت لیست آرشیو نیز برابر با ۵۰ در نظر گرفته شده است. در ادامه برای ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این الگوریتم با الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) [39] و الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) [40] انجام شده است. نمودار ۸، جواب‌های بهینه پارتوی حاصل از این سه الگوریتم را بر حسب دو تابع هدف راندمان انرژی و هزینه کل نشان می‌دهد. برای مقایسه کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند چندهدفه غالباً از دو شاخص معیار پوشش مجموعه (C) و تعداد جواب‌های پارتو (NOS) استفاده می‌شود. شاخص C نسبت تعداد جواب‌های پارتو از مجموعه A_2 که توسط جواب‌های پارتوی مجموعه A_1 مغلوب می‌شوند را مشخص می‌کند. هر چه مقدار این شاخص بزرگ‌تر باشد، به مفهوم آن است که الگوریتم بهینه‌سازی A_1 کارایی بهتری نسبت به الگوریتم A_2 دارد. با فرض این که A_1 و A_2 مجموعه جواب‌های دو الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه باشند، رابطه ریاضی این دو شاخص به صورت زیر است [27, 28]:

$$C(A_1, A_2) = \frac{|a_2 \in A_2, \exists a_1 \in A_1, a_1 < a_2|}{|A_2|}$$

$$\begin{cases} C(A_1, A_2) = 0, & \text{if no member of } A_2 \text{ is dominated} \\ & \text{by members of } A_1 \\ C(A_1, A_2) = 1, & \text{if all the members of } A_2 \text{ are} \\ & \text{dominated by the members of } A_1 \end{cases}$$

در خصوص شاخص NOS نیز هر چه تعداد جواب‌های پارتوی یک الگوریتم بیشتر باشد، آن الگوریتم مطلوب‌تر است. در جدول ۸ خروجی حاصل از ۲۰ بار اجرای سه الگوریتم بهینه‌سازی روی دو شاخص معرفی شده آورده شده است.



نمودار ۸) جواب‌های بهینه پارتوی حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

جدول ۸) مقایسه بین سه الگوریتم بهینه‌سازی از دیدگاه شاخص‌های چندهدفه

شاخص	کمترین	میانگین	بیشترین
$C(NSGA - II, MOFLA)$	۰/۰۰۸	۰/۰۲۸	۰/۰۳۶
$C(MOFLA, NSGA - II)$	۰/۹۶۱	۰/۹۷۴	۰/۹۸۳
$C(MOPSO, MOFLA)$	۰/۰۱۲	۰/۰۳۳	۰/۰۴۲
$C(MOFLA, MOPSO)$	۰/۹۵۳	۰/۹۶۱	۰/۹۷۸
$NOS(NSGA - II)$	۲۸۹	۳۱۸	۳۶۳
$NOS(MOFLA)$	۳۳۶	۳۹۷	۴۶۱
$NOS(MOPSO)$	۳۰۴	۳۴۲	۴۰۷

```

begin
Objective functions  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_{NOF}(x)$ 
Randomly initialize the population of fireflies
 $x_i(t), i = 1, 2, \dots, n,$ 
Initialize Archive list and  $t = 0;$ 
Compute the fitness values of all firefly by  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_{NOF}(x)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$  and  $\beta_0$ 
Update Archive list
while ( $t < Maxgen$ )
for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
for  $j = 1 : n$  all  $n$  fireflies
if  $x_j(t)$  dominates  $x_i(t)$ 
Move  $x_i$  towards  $x_j$  according to equation (53)
Calculate the fitness values of  $x_i(t)$  (new candidate solution);
else
Move  $x_i$  towards  $x_j$  according to equation (56)
Calculate the fitness values of  $x_i(t)$  (new candidate solution);
end if
end for j
end for i
Update Archive list
++ t
end while
Delete Extra size from Archive list using gridding and Eq. (55)
end
    
```

شکل ۴) شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه (MOFLA)

۶- نتایج بهینه‌سازی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی، شاخص‌های عمومی مختلفی وجود دارند که مهم‌ترین آنها شاخص بهترین جواب، سرعت همگرایی و نرخ موفقیت است. نرخ موفقیت طبق تعریف عبارت از نسبت تعداد دفعاتی است که الگوریتم به یک مقدار از پیش تعیین شده به تعداد کل اجراها همگرا می‌شود. به عنوان مثال اگر از ۱۰ بار اجرای یک الگوریتم، ۸ بار آن، الگوریتم به مقدار بهینه از پیش تعیین شده همگرا شود، می‌گوییم نرخ موفقیت آن الگوریتم برابر با ۸۰٪ است.

عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب اصلاح شده با نسخه اصلی آن، روی ۵ تابع استاندارد رزنبراک، رستریجن، اسویفل، گریوانک و اکی مورد ارزیابی قرار گرفت [38]. این توابع جزء توابع استاندارد هستند که برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند. میانگین نرخ موفقیت نسخه اصلی الگوریتم در مقایسه با نسخه اصلاح شده آن به ازای ۵۰ بار اجرا، به ترتیب ۸۸٪ در مقابل ۹۶٪ به دست آمد. همچنین به طور میانگین در ۹۴٪ اجراها، بهترین جواب حاصل از نسخه اصلاح شده الگوریتم، بهینه‌تر از پاسخ حاصل از نسخه اصلی الگوریتم بود. سرعت همگرایی الگوریتم را می‌توان به نوعی متناظر با تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف برای رسیدن به یک مقدار از پیش تعیین شده دانست. هر چه تعداد دفعات ارزیابی تابع هدف کمتر باشد، سرعت همگرایی الگوریتم نیز بیشتر خواهد بود. نتایج ارزیابی‌ها نشان دادند که در ۹۶٪ اجراها، سرعت همگرایی نسخه اصلاح شده الگوریتم، بیشتر از نسخه استاندارد آن بوده که این خود نشان‌دهنده کارایی راهکار ارایه شده برای ایجاد مصالحه بین دو مفهوم اکتشاف و استخراج در نسخه اصلاح شده الگوریتم بهینه‌سازی است.

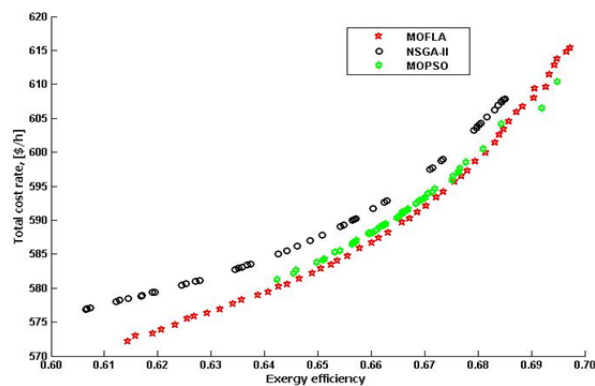
در ادامه نتایج بهینه‌سازی سیستم تولید چنگانه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه به شرح زیر انتخاب شده‌اند:

برای جواب پارتوی k ام، پارامترهای f_i ، f_i^{min} و f_i^{max} مقادیر واقعی، بیشینه و کمینه f_i تابع هدف هستند. n و m نیز به ترتیب تعداد توابع هدف و تعداد جواب‌های بهینه پارتو هستند. بنابراین جواب مورد توافق جابجایی است که دارای بیشترین مقدار تابع عضویت متناظر با رابطه ۵۹ باشد. در نمودار ۸ این جواب بهینه با حرف B نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با حرکت از نقطه B به سمت نقطه C تابع هزینه افزایش می‌یابد و راندمان با حرکت به سمت نقطه A افت می‌کند. بنابراین نقطه B هم از نظر هزینه تمام‌شده محصول و هم از نظر راندمان سیستم، نزدیک‌ترین حالت را به نقطه ایده‌آل دارد. در جدول ۹، پارامترهای طراحی به‌ازای این سه نقطه آورده شده است. با توجه به این جدول مشاهده می‌شود از نقطه A تا نقطه C نرخ هزینه کلی سیستم و راندمان آگرژی افزایش می‌یابد. مشخصات ترمودینامیک میکروتوربین به‌ازای این سه نقطه نیز در جدول ۱۰ آورده شده است. با توجه به نمودار ۸ مشاهده می‌شود که راندمان آگرژی در محدوده مرز پارتو بین ۶۰ تا ۶۹٪ است. برای تعیین یک رابطه ریاضی بین راندمان آگرژی و نرخ هزینه کلی در این ناحیه، یک برازش منحنی بین نقاط انجام شده و رابطه ریاضی حاصل از این برازش به صورت زیر است:

(۶۰)

$$\dot{C}_{tot} = \frac{692.4\varphi^3 - 2284\varphi^2 + 1429\varphi - 129.7}{\varphi^5 + 51.48\varphi^4 - 136.1\varphi^3 + 130.7\varphi^2 - 55.98\varphi + 9.27}$$

با استفاده از این رابطه می‌توان به‌ازای راندمان آگرژی در محدوده ۶۰ تا ۶۹٪، نرخ هزینه کل سیستم را محاسبه نمود.



نمودار ۹) مقایسه بین عملکرد سه الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه

جدول ۹) مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به‌ازای نقاط A، B و C

C	B	A	پارامترهای طراحی
۱۴/۹۷	۱۴/۹	۱۴/۹	نسبت فشار کمپرسور (T_{Ac})
۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۸۸	راندمان ایزنتروپیک کمپرسور (η_{Ac})
۰/۹	۰/۸۹	۰/۹	راندمان ایزنتروپیک توربین گاز (η_{GT})
۱۴۹۹	۱۴۹۶	۱۴۹۸	دمای ورودی توربین گاز ($T_{G,Turbine}$)
۱۴/۹۵	۱۴/۸	۱۴/۹۸	اختلاف دمای نقطه پینچ (T_{PP})
۰/۸۸	۰/۷۸	۰/۸۷	راندمان ایزنتروپیک توربین بخار (η_{ST})
۰/۸۷	۰/۸۴	۰/۷۵	راندمان ایزنتروپیک پمپ (η_{Pump})
۸/۱	۹/۸۶	۹/۹	فشار کندانسور (P_{cond})
۲/۱	۱/۳۱	۴/۸	دمای اواپراتور چیلر جذبی (T_{EVP})
۲۴۸	۲۴۶	۲۳۹	فشار ورودی توربین ORC ($P_{Tur,ORC}$)
۲۷/۲	۳۴/۸	۲۴/۶	فشار اواپراتور ORC ($P_{EVP,ORC}$)

با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود که از دیدگاه هر دو شاخص، الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب چندهدفه کارایی بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد. به‌طور نمونه قبل از حذف اعضای اضافی از لیست آرشیو، میانگین تعداد جواب‌های پارتوی حاصل از ۲۰ بار اجرا، در الگوریتم MOFLA برابر با ۳۹۷ عضو است. در حالی که میانگین این شاخص به‌ازای دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO به ترتیب ۳۱۸ و ۳۴۲ است. همچنین از دیدگاه شاخص معیار پوشش (C)، درصد قابل توجهی از جواب‌های پارتوی حاصل از دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO، مغلوب جواب‌های پارتوی الگوریتم MOFLA می‌شوند. این در حالی است که درصد بسیار کمی از جواب‌های پارتوی الگوریتم کرم شب‌تاب، مغلوب جواب‌های پارتو دو الگوریتم دیگر شده‌اند.

به‌عنوان نمونه، به‌طور میانگین ۲/۸٪ جواب‌های پارتوی الگوریتم MOFLA مغلوب جواب‌های پارتو الگوریتم NSGA-II شده‌اند. در حالی که این درصد برای الگوریتم NSGA-II و MOPSO نسبت به الگوریتم MOFLA به ترتیب ۹۷/۴٪ و ۹۶/۱٪ است. بدین ترتیب می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در بهینه‌سازی سیستم مورد نظر، الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر داشته باشد. همچنین با توجه به نمودار ۹ مشاهده می‌شود که کیفیت و تنوع جواب‌های حاصل از الگوریتم کرم شب‌تاب به مراتب بهتر از دو الگوریتم بهینه‌سازی دیگر است. در نمودار ۸ جواب‌های بهینه پارتو برای دو تابع هدف راندمان آگرژی و هزینه کلی سیستم، به‌ازای الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم کرم شب‌تاب چندهدفه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش راندمان آگرژی، هزینه کلی سیستم نیز افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نمودار، حداکثر راندمان آگرژی در نقطه طراحی C به وجود می‌آید (۶۹/۵٪)، در حالی که نرخ هزینه کلی محصولات نیز در این نقطه بیشترین مقدار است (۶۱۳\$/h). از طرفی کمترین نرخ هزینه کلی محصولات که حدود ۵۷۲\$/h است، در نقطه A به وجود می‌آید، در حالی که راندمان آگرژی در این نقطه کمترین مقدار خود را داراست. بنابراین در صورتی که تابع هدف سیستم تنها هزینه محصولات را شامل شود، نقطه طراحی A یک راه حل بهینه است و در حالتی که تابع هدف فقط راندمان آگرژی باشد، نقطه طراحی C نقطه بهینه است. با توجه به این که همواره می‌بایست مصالحه‌ای بین این دو تابع هدف متضاد در نظر گرفته شود، در این مقاله برای انتخاب یک جواب از بین چندین جواب بهینه پارتو از روش تصمیم‌گیری فازی max-min استفاده شده است. در این روش برای هر یک از جواب‌های بهینه پارتو، یک تابع عضویت فازی مطابق با رابطه زیر تعریف می‌کنیم [41]:

(۵۸)

$$\mu_i(k) = \begin{cases} 0 & f_i(k) > f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(k)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(k) \leq f_i^{max} \\ 1 & f_i(k) < f_i^{min} \end{cases}$$

سپس برای جواب k ام تابع عضویت نرمالیزه‌شده زیر را در نظر می‌گیریم [41]:

$$\mu(k) = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(k)}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \mu_i(k)} \quad (59)$$

در روابط فوق، $\mu_i(k)$ مقدار تابع عضویت متناظر با تابع هدف i ام

2- Taheri M, Mosaffa A, Farshi LG. Energy, exergy and economic assessments of a novel integrated biomass based multigeneration energy system with hydrogen production and LNG regasification cycle. *Energy*. 2017;125:162-177.

3- Khalid F, Dincer I, Rosen MA. Energy and exergy analyses of a solar-biomass integrated cycle for multigeneration. *Solar Energy*. 2015;112:290-299.

4- Nami H, Akrami E. Analysis of a gas turbine based hybrid system by utilizing energy, exergy and exergoeconomic methodologies for steam, power and hydrogen production. *Energy Conversion and Management*. 2017;143:326-337.

5- Chen Q, Han W, Zheng JJ, Sui J, Jin HG. The exergy and energy level analysis of a combined cooling, heating and power system driven by a small scale gas turbine at off design condition. *Applied Thermal Engineering*. 2014;66(1-2):590-602.

6- Ezzat M, Dincer I. Energy and exergy analyses of a new geothermal-solar energy based system. *Solar Energy*. 2016;134:95-106.

7- Abbasi M, Chahartaghi M, Hashemian SM. Energy, exergy, and economic evaluations of a CCHP system by using the internal combustion engines and gas turbine as prime movers. *Energy Conversion and Management*. 2018;173:359-374.

8- Zeng R, Li H, Liu L, Zhang X, Zhang G. A novel method based on multi-population genetic algorithm for CCHP-GSHP coupling system optimization. *Energy Conversion and Management*. 2015;105:1138-1148.

9- Siddiqui O, Dincer I. Examination of a new solar-based integrated system for desalination, electricity generation and hydrogen production. *Solar Energy*. 2018;163:224-234.

10- Khalid F, Dincer I, Rosen MA. Techno-economic assessment of a solar-geothermal multigeneration system for buildings. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(33):21454-21462.

11- Sanaye S, Hajabdollahi H. Thermo-economic optimization of solar CCHP using both genetic and particle swarm algorithms. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2015;137(1):011001.

12- Hajabdollahi H, Ganjehkaviri A, Jaafar MNM. Assessment of new operational strategy in optimization of CCHP plant for different climates using evolutionary algorithms. *Applied Thermal Engineering*. 2015;75:468-480.

13- Zhang H, Chen R, Wang F, Wang H, Wang Y. Multi-objective optimization for operational parameters of a micro-turbine CCHP system based on genetic algorithm. *Procedia Engineering*. 2017;205:1807-1814.

14- Sadeghzadeh H, Ehyaei M, Rosen M. Techno-economic optimization of a shell and tube heat exchanger by genetic and particle swarm algorithms. *Energy Conversion and Management*. 2015;93:84-91.

15- Lorestani A, Ardehali M. Optimal integration of renewable energy sources for autonomous tri-generation combined cooling, heating and power system based on evolutionary particle swarm optimization algorithm. *Energy*. 2018;145:839-855.

16- Lorestani A, Ardehali M. Optimization of autonomous combined heat and power system including PVT, WT, storages, and electric heat utilizing novel evolutionary particle swarm optimization algorithm. *Renewable Energy*. 2018;119:490-503.

17- Tichi S, Ardehali M, Nazari M. Examination of energy price policies in Iran for optimal configuration of CHP

جدول ۱۰) مشخصات ترمودینامیک سیستم میکروتوربین روی نقاط مختلف مرز پارتو

نوع سیستم	A	B	C
توان خالص (کیلووات)	۱۰۲۰۷	۱۱۳۲۳	۱۱۴۵۱
گرمایش (کیلووات)	۵۱۰۷	۵۵۸۵	۶۸۳۳
سرمایش (کیلووات)	۹۳۹/۸۵	۹۲۵/۱	۹۳۰/۳۸
راندمان انرژی	۰/۶۱	۰/۶۴	۰/۶۷
نرخ هزینه کلی (دلار بر ساعت)	۵۹۲/۷	۶۰۱/۳۱	۶۱۵/۶۵
دبی جرمی آب گرم (کیلوگرم بر ساعت)	۲۹۸۱	۲۹۱۸	۳۰۶۱
دبی جرمی آب آشامیدنی (کیلوگرم بر ساعت)	۰/۷۲	۰/۸۴	۱/۲۸
نرخ دی‌اکسیدکربن (کیلوگرم بر کیلووات ساعت)	۱۳۶/۹	۱۲۹/۱۳	۱۱۸/۴۶

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با رویکردی همه‌جانبه به تحلیل انرژی-اقتصادی و زیست‌محیطی یک سیستم تولید چندانگانه با محرک اولیه میکروتوربین برای تولید همزمان توان، گرما، سرما، آب آشامیدنی و آب گرم پرداخته شد. سپس با استفاده از آنالیز انرژی پارامترهای موثر بر عملکرد سیستم تعیین شد. نتایج نشان دادند که بیشترین تخریب انرژی در قسمت مربوط به محرک اولیه و محفظه احتراق رخ می‌دهد که علت آن برگشت‌ناپذیری و اکسیداسیون است. ادامه با استفاده از مفهوم انرژی و به‌کارگیری توابع اقتصادی و زیست‌محیطی، دو تابع هدف راندمان انرژی و نرخ هزینه برای سیستم استخراج شد. تحلیل پارامتریک سیستم نشان داد که این دو تابع هدف در تضاد با یکدیگر هستند. بدین منظور برای بهینه‌سازی اهداف مورد نظر، از الگوریتم بهینه‌سازی کرم شبتاب چندهدفه استفاده شد. برای بررسی کارایی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، نتایج حاصل از این الگوریتم با دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مقایسه شد. براساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی سیستم، راندمان انرژی می‌تواند تا ۶۹٪ افزایش یابد. همچنین با در نظر گرفتن نرخ هزینه کلی سیستم به‌عنوان تنها تابع هدف، این مقدار می‌تواند تا ۵۷۲\$/h کاهش یابد. با توجه به این که نتیجه اعمال الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه منجر به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه پارتو خواهد شد که نشان‌دهنده ناحیه مصالحه بین توابع هدف است، در این مقاله برای انتخاب جواب نهایی از بین چندین جواب بهینه موجود، از روش تصمیم‌گیری فازی max-min استفاده شد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: فرزاد رشیدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۰٪)؛ حلیمه رشیدی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۳۰٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

منابع

1- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic modeling and multi-objective evolutionary-based optimization of a new multigeneration energy system. *Energy Conversion and Management*, 2013;76:282-300.

- solar-biomass based multi-generation energy system including water desalination and liquefaction of natural gas system: Thermodynamic and thermoeconomic optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2018;196:424-437.
- 31- Mohammadi A, Mehrpooya M. Exergy analysis and optimization of an integrated micro gas turbine, compressed air energy storage and solar dish collector process. *Journal of Cleaner Production*. 2016;139:372-383.
- 32- Soltani R, Dincer I, Rosen MA. Thermodynamic analysis of a novel multigeneration energy system based on heat recovery from a biomass CHP cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2015;89:90-100.
- 33- Islam S, Dincer I, Yilbas BS. Development, analysis and assessment of solar energy-based multigeneration system with thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*. 2018;156:746-756.
- 34- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Thermoeconomic multi-objective optimization of a novel biomass-based integrated energy system. *Energy*. 2014;68:958-970.
- 35- Moghimi M, Emadi M, Ahmadi P, Moghadasi H. 4E analysis and multi-objective optimization of a CCHP cycle based on gas turbine and ejector refrigeration. *Applied Thermal Engineering*. 2018;141:516-530.
- 36- Sahu RK, Panda S, Padhan S. A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;64:9-23.
- 37- Feshki Farahani H, Rashidi F. An improved teaching-learning-based optimization with differential evolution algorithm for optimal power flow considering HVDC system. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2017;9(3):035505.
- 38- Czerniak JM, Zarzycki H. Artificial acari optimization as a new strategy for global optimization of multimodal functions. *Journal of Computational Science*. 2017;22:209-227.
- 39- Tripathi PK, Bandyopadhyay S, Pal SK. Multi-objective particle swarm optimization with time variant inertia and acceleration coefficients. *Information Sciences*. 2007;177(22):5033-5049.
- 40- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002;6(2):182-197.
- 41- Borhanazad H, Mekhilef S, Ganapathy VG, Modiri-Delshad M, Mirtaheri A. Optimization of micro-grid system using MOPSO. *Renewable Energy*. 2014;71:295-306.
- and CCHP systems based on particle swarm optimization algorithm. *Energy Policy*. 2010;38(10):6240-6250.
- 18- Wang L, Yang Y, Dong C, Morosuk T, Tsatsaronis G. Parametric optimization of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution. *Energy Conversion and Management*. 2014;85:828-838.
- 19- Fetanat A, Khorasaninejad E. Size optimization for hybrid photovoltaic-wind energy system using ant colony optimization for continuous domains based integer programming. *Applied Soft Computing*. 2015;31:196-209.
- 20- Guo L, Liu W, Cai J, Hong B, Wang C. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system. *Energy Conversion and Management*. 2013;74:433-445.
- 21- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system. *Solar Energy*. 2014;108:576-591.
- 22- Ahmadi P, Dincer I, Rosen MA. Multi-objective optimization of an ocean thermal energy conversion system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(24):7601-7608.
- 23- Imran M, Usman M, Park BS, Kim HJ, Lee DH. Multi-objective optimization of evaporator of organic Rankine cycle (ORC) for low temperature geothermal heat source. *Applied Thermal Engineering*. 2015;80:1-9.
- 24- Wang M, Wang J, Zhao P, Dai Y. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2015;89:289-297.
- 25- Sanaye S, Hajabdollahi H. 4E analysis and multi-objective optimization of CCHP using MOPSOA. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2014;228(1):43-60.
- 26- Soheyli S, Mayam MH, Mehrjoo M. Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC-MOPSO algorithm. *Applied Energy*. 2016;184:375-395.
- 27- Rashidi H, Khorshidi J. Exergy analysis and multiobjective optimization of a biomass gasification based multigeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(5):2631-2644.
- 28- Rashidi H, Khorshidi J. Exergoeconomic analysis and optimization of a solar based multigeneration system using multiobjective differential evolution algorithm. *Journal of Cleaner Production*. 2018;170:978-990.
- 29- Ishaq H, Dincer I, Naterer G. Exergy-based thermal management of a steelmaking process linked with a multi-generation power and desalination system. *Energy*. 2018;159:1206-1217.
- 30- Ghasemi A, Heidarnejad P, Noorpoor A. A novel