



مدل سازی و بهینه سازی عملکرد شبه پایای یک نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره سازی انرژی گرمایی

وحید خلیل زاده باویل¹، جواد محمودی مهر^{2*}

1- کارشناسی ارشد، رشته مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 416353756. mahmoudimehr@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 10 مرداد 1394

پذیرش: 04 شهریور 1394

ارائه در سایت: 23 شهریور 1394

کلید واژگان:

نیروگاه حرارتی خورشیدی

سیستم ذخیره سازی گرما

مدل سازی

بهینه سازی

چکیده

مطالعه حاضر به بهینه سازی عملکرد روزانه یک نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره سازی گرما می پردازد. مدل سازی از طریق حل مجموعه معادلات غیرخطی حاکم صورت پذیرفته و از طریق مقایسه با تحقیقات پیشین اعتبارسنجی می شود. "حداکثر مدت زمان تولید" و "حداکثر سود حاصله" توابع هدف بهینه سازی را تشکیل می دهند که ابتدا به صورت مجزا (دو مسأله تک هدفه) و سپس به صورت همزمان (یک مسأله چندهدفه) در نظر گرفته می شوند. الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج مربوط به تابع هدف اول (حداکثر زمان تولید) نشان دهنده افزایش 7 ساعته در مدت زمان تولید روزانه، در اثر به کارگیری سیستم ذخیره سازی گرما می باشد. این امر از طریق ذخیره سازی انرژی در زمان های با سطح بالای تابش خورشیدی و استفاده از انرژی ذخیره شده برای تولید الکتریسیته در زمان های بدون تابش و یا با تابش ناکافی محقق شده است. نتایج مربوط به تابع هدف دوم (حداکثر سود حاصله) بیان گر افزایش 13/5% در سود حاصله، در اثر به کارگیری سیستم ذخیره سازی گرما می باشد. این بهبود، از طریق ذخیره سازی انرژی گرمایی در زمان های با ارزش پایین الکتریسیته و استفاده از آن برای حداکثر تولید در زمان های با ارزش بالای الکتریسیته حاصل شده است. در نهایت، در بهینه سازی چندهدفه، با ایجاد یک توازن مناسب بین توابع هدف ذکر شده، به طور همزمان، افزایش 5 ساعته در زمان تولید و افزایش 8/1% در سود، حاصل شده است.

Modeling and optimization of the quasi-steady operation of a Solar Power Plant equipped with thermal energy storage system

Vahid Khalilzadeh Bavi, Javad Mahmoudimehr*

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

*P.O.B. 41635-3756 Rasht, Iran, mahmoudimehr@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 August 2015
Accepted 26 August 2015
Available Online 14 September 2015

Keywords:
Solar Thermal Power Plant
Thermal Energy Storage System
Modeling
Optimization

ABSTRACT

This study is concerned with optimizing the daily operation of a solar power plant equipped with thermal energy storage system (TES). The modeling is performed by solving a set of non-linear governing equations and is verified through comparison with the literature. "Maximum production period" and "maximum revenue" constitute the objectives of the optimization study which are first considered individually (as two single-objective problems) and are then considered simultaneously (as a multi-objective problem). Genetic Algorithm (GA) is employed as the optimization tool. The results of the first objective (maximum production period) shows a 7 hour increase in the daily production time as a result of employing the TES system. This occurred through saving energy during times of high solar radiation and using the stored energy for electricity generation during times of low or zero solar radiation. The results of the second objective (maximum revenue) indicate 13.5% increase in the produced profit as a result of employing the TES system. This improvement was resulted from saving energy during times of low electricity price and using the stored energy for maximum electricity generation during times of high electricity price. Finally, in the multi-objective study, 5 hour increase in the production period and 8.1% increase in the revenue were simultaneously obtained as a result of a proper tradeoff between the two objectives.

1- مقدمه

توجه ویژه به منابع انرژی تجدیدپذیر را ضروری ساخته است. نیروگاه های خورشیدی تمرکزی¹ از مناسب ترین فناوری های

رشد فزاینده تقاضای جهانی انرژی، اتمام منابع سوخت های فسیلی طی چند دهه آینده و مشکلات زیست محیطی مرتبط با مصرف سوخت های فسیلی،

1- Concentrating Solar Plants, (CSPs)

Please cite this article using:

V. Khalilzadeh Bavi, J. Mahmoudimehr, Modeling and optimization of the quasi-steady operation of a Solar Power Plant equipped with thermal energy storage system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 249-258, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گردید.

بهینه‌سازی اقتصادی-حرارتی یک نیروگاه خورشیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط سیلوا و همکاران [11] صورت گرفت. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی بر مبنای سود دوره عمر⁴ منجر به واحدهای بزرگتر ولی با راندمان میدان خورشیدی پایین‌تر گشته و در مقابل بهینه‌سازی بر اساس زمان بازگشت سرمایه، باعث ایجاد واحدهای کوچکتر با راندمان میدان خورشیدی بالاتری می‌شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که اهداف اقتصادی کوتاه‌مدت به‌منزله مانعی بر سر راه ورود نیروگاه‌های خورشیدی به بازارهای صنعتی و رقابت با نیروگاه‌های مرسوم فسیلی است.

مهرنیا و حقیقی خوشخو [12]، ضمن شبیه‌سازی بخش میدان خورشیدی نیروگاه سیکل ترکیبی یزد با کمک نرم‌افزار ای‌ای‌اس، به بهینه‌سازی اندازه میدان خورشیدی پرداختند. ایشان در این تحقیق با در نظرگیری مشخصات یکسان در بخش تولید توان، چهار مزرعه خورشیدی با اندازه‌های مختلف را مورد نظر قرار داده و هزینه تمام شده تولید برق برای هر یک را محاسبه نموده و در نتیجه اندازه بهینه میدان خورشیدی را تعیین نمودند.

حقیقی خوشخو و فضلی [13] ضمن توسعه یک کد شبیه‌ساز برای آنالیز قدرت خروجی نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره‌ساز، به انتخاب سیستم ذخیره‌ساز مناسب برای نیروگاه مورد نظر پرداخته و نتایج را به ازای شرایط مختلف آب و هوایی مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده‌اند.

مقاله حاضر ضمن ارائه یک مدل حرارتی از نیروگاه خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی گرما و اعتبارسنجی آن، به بهینه‌سازی عملکرد روزانه و شبه‌پایای نیروگاه مورد نظر با اهداف حداکثر پایداری تولید و حداکثر سود روزانه (به‌صورت تک‌هدفه و دوهدفه) می‌پردازد. همچنین تأثیر سیستم ذخیره‌ساز بر اهداف ذکرشده بررسی می‌گردد. با توجه به مرور صورت گرفته بر ادبیات فن، ارائه مدلی شبه پایا، یکپارچه و با جزئیات حرارتی از یک نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره‌ساز و همچنین بهینه‌سازی با در نظرگیری همزمان توابع هدف حداکثر پایداری تولید و حداکثر سود حاصله، از جمله مواردی هستند که در تحقیقات پیشین مشاهده نشده است و نوآوری‌های مقاله را تشکیل می‌دهند.

2- مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی و معادلات حاکم

نیروگاه خورشیدی آنداسول-1⁵ واقع در گرانا‌دا اسپانیا ([14])، به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. بخش حاضر به تشریح عملکرد بخش‌های مختلف نیروگاه خورشیدی و معادلات حاکم می‌پردازد. شکل 1 نمای کلی از نیروگاه و نمادهای در نظر گرفته شده برای پارامترهای عملکردی هر بخش را نشان می‌دهد. در مقاله حاضر، شبیه‌سازی عملکرد نیروگاه از طریق حل همزمان مجموعه معادلات حاکم به روش نیوتن رافسون صورت می‌پذیرد.

2-1- معادلات حاکم بر بخش میدان خورشیدی

بخش میدان خورشیدی متشکل از کلکتورهای نوع ناودانی-سهموی⁶ بوده که تابش خورشیدی را به صورت متمرکزشده به سیال انتقال گرما⁷، که نوعی روغن با پایداری گرمایی بالا می‌باشد، انتقال می‌دهد. در نیروگاه تحت بررسی، انرژی گرمایی جذب‌شده با تابش عمودی مستقیم⁸ رابطه‌ای خطی دارد [14].

تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته بوده و نصب آن‌ها به سرعت در حال افزایش است [1]، از جمله مزایای این نیروگاه‌ها، می‌توان به منبع نامحدود انرژی آن و قابلیت ترکیب آن‌ها با نیروگاه‌های سنتی اشاره نمود. همچنین، اغلب بهترین مکان‌ها برای احداث این نیروگاه‌ها، بیابان‌ها و نقاط بایر و بدون استفاده است [2].

از سوی دیگر، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا و تابش‌های خورشیدی متغیر و نامطمئن، از عمده‌ترین مشکلات استفاده از سیستم‌های خورشیدی محسوب می‌شوند [3].

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی گرما و بهینه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی می‌تواند به حل مشکلات ذکر شده کمک مؤثری بنماید.

مون‌تس و همکاران [4]، به منظور کمینه‌سازی هزینه تراز شده انرژی¹، به مقایسه چند نیروگاه خورشیدی با اندازه میدان خورشیدی² متفاوت، اما با بخش تولید توان یکسان پرداختند. آن‌ها دریافتند که برای واحدهای بدون سیستم ذخیره‌سازی گرما، اندازه میدان خورشیدی نباید بسیار بزرگ انتخاب شود، زیرا انرژی گرمایی تولیدی مازاد بر توان نامی بخش تولید توان به هدر خواهد رفت.

لیزاراگا-گارسیا و همکاران [5]، به‌منظور حداکثرسازی سود حاصله از یک نیروگاه تمرکزی مجهز به سیستم ذخیره‌سازی گرما، از روش برنامه‌ریزی غیرخطی³ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی در شرایط با نوسان بالای ارزش برق، در مقایسه با شرایط نوسان متوسط، تأثیر بیشتری بر میزان سود حاصله دارد.

مارتین و همکاران [6]، با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی، به بهینه‌سازی عملکرد سالیانه نیروگاه آلمریای اسپانیا پرداختند و به هزینه تراز شده 0/15 یورو بر کیلووات ساعت دست یافتند که این میزان در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی کمی بالاتر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد، در صورتی که ظرفیت تجهیزات خورشیدی به نیروگاه‌های حرارتی فسیلی نزدیک‌تر شود، هزینه تراز شده انرژی کاهش می‌یابد.

کاست و همکاران [7]، از روش برنامه‌ریزی گسسته-پیوسته برای یافتن ابعاد بهینه سیستم ذخیره‌سازی و همچنین ابعاد بهینه میدان کلکتور یک نیروگاه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که طرح‌های حمایتی جاری، انگیزه کافی برای بکارگیری ظرفیت‌های ذخیره‌سازی گرمایی بالا را ایجاد نمی‌نماید. باقرنژاد و یعقوبی [8]، به‌منظور حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انهدام انرژی، به کمک الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی عملکرد نیروگاه ترکیبی خورشیدی-فسیلی پرداختند.

کابللو و همکاران [9]، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن حداکثر سود سالیانه به عنوان تابع هدف، به بهینه‌سازی اندازه میدان خورشیدی، ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی گرمایی و ظرفیت سیستم کمکی پرداختند. نتایج حاصله برای یک نیروگاه 50 مگاواتی، نشان‌دهنده سود سالیانه‌ای معادل با 19/3 میلیون یورو و هزینه تراز شده انرژی در حدود 18/5 یورو سنت بر کیلووات ساعت می‌باشد.

سلطانی و همکاران [10]، به کمک الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی چند-هدفه عملکرد یک نیروگاه ترکیبی (خورشیدی-فسیلی) با کلکتورهایی از نوع هلیوستات پرداختند که در نتیجه آن کاهش قابل توجهی در مصرف سوخت و انهدام انرژی شیمیایی (به‌عنوان عامل اصلی برگشت‌ناپذیری) حاصل

4- Life Cycle saving

5- Andasol_1

6- Parabolic Trough

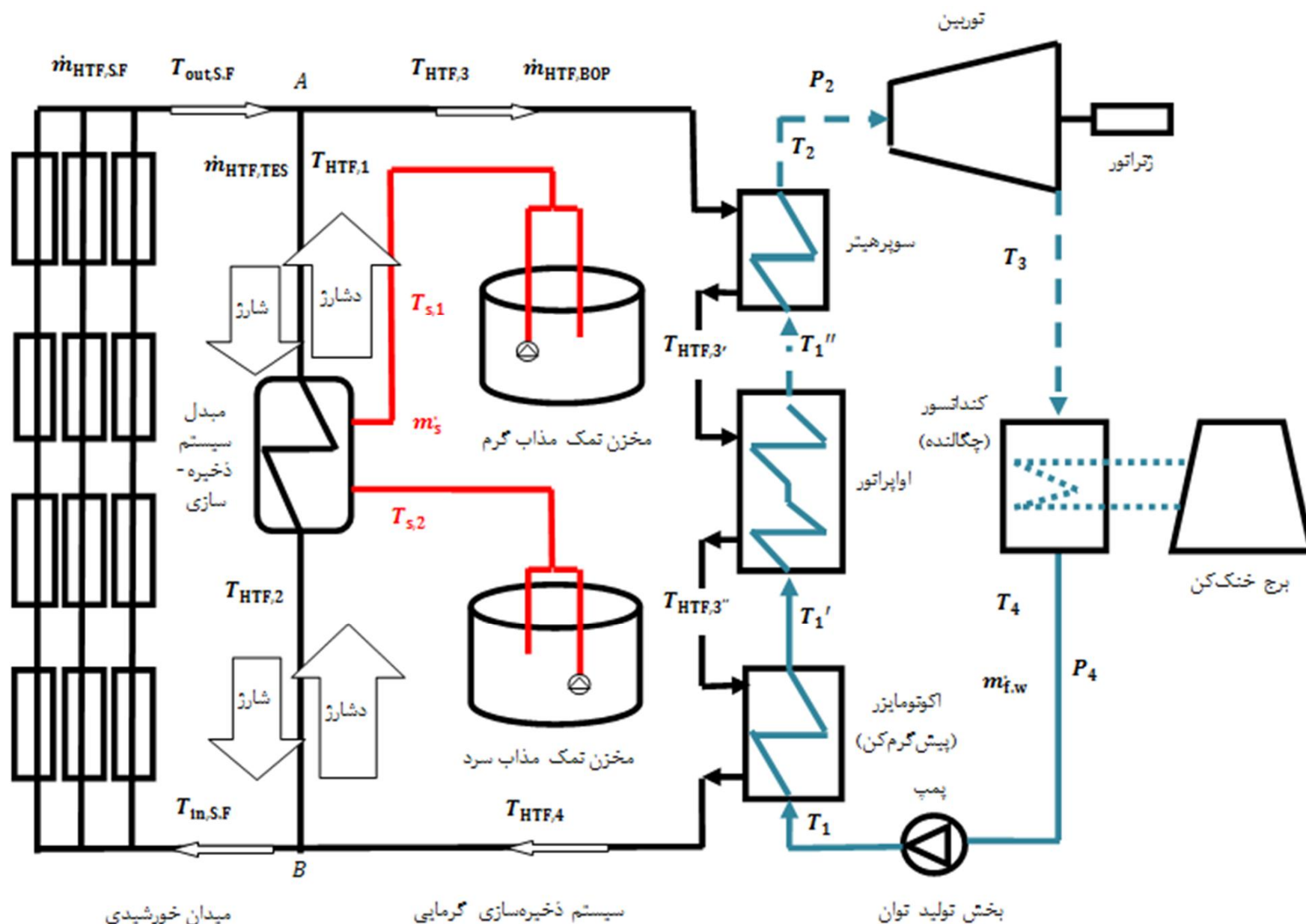
7- Heat Transfer Fluid, (HTF)

8- Direct Normal Irradiation, (DNI)

1- Levelized Cost Of Energy, (LCOE)

2- Solar field, (S.F)

3- Non Linear Programming, (NLP)



شکل 1 نمای کلی نیروگاه خورشیدی

در روابط بالا، M ، u و h ، به ترتیب نشان دهنده جرم نمک مذاب موجود در مخزن، انرژی داخلی و آنتالپی نمک مذاب می باشد. زیرنویس های C و H نمایان گر مخازن سرد و گرم، زیرنویس های t و $t + \Delta t$ نشان دهنده دو زیربازه زمانی متوالی و زیر نویس های 1 و 2 به ترتیب نشان گر شرایط ورودی و مخزن گرم و خروجی از مخزن سرد می باشند. در معادلات قبل، آنتالپی و انرژی داخلی به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده و طبق رابطه (7) با انتگرال گیری از گرمای ویژه از دمای مرجع اختیاری 220 درجه سلسیوس تا دمای مورد نظر حاصل می شود [18].

$$h = \int_{220+273.15}^{T_{\text{salt}}+273.15} C_p dT = \int_{220+273.15}^{T_{\text{salt}}+273.15} [1443 + 0.172 (T - 273.15)] dT \quad (7)$$

برای مبدل حرارتی این بخش نیز داریم:

$$\dot{Q}_{\text{exch, TES}} = \dot{m}_{\text{HTF, TES}} (h_{\text{HTF, 1}} - h_{\text{HTF, 2}}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{\text{exch, TES}} = \dot{m}_s (h_{s, 1} - h_{s, 2}) \quad (9)$$

در روابط (8) و (9)، $\dot{Q}_{\text{exch, TES}}$ نرخ کلی انتقال گرما بین دو سیال سرد و گرم می باشد. عملکرد گرمایی مبدل حرارتی، طبق رابطه (10)، توسط اختلاف دمای متوسط لگاریتمی¹ و ضریب کلی انتقال حرارت آن تعیین می شود.

$$\dot{Q}_{\text{exch, TES}} = (UA)_{\text{des, TES}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{HTF, TES}}}{\dot{m}_{\text{HTF, TES, des}}} \right)^{0.8} \Delta T_{\text{lm, TES}} \quad (10)$$

در فرایند شارژ سیستم ذخیره سازی گرمایی، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی از رابطه (11) به دست می آید:

$$\dot{Q}_{\text{th, S.F}} = 0.386 DNI - 20.94 \quad (1)$$

مقادیر تابش خورشیدی برای موقعیت های مختلف و برای بازه های نیم ساعته در مرجع [15] موجود می باشد. انرژی گرمایی جذب شده، طبق رابطه (2)، باعث افزایش دمای روغن و تغییر آنتالپی آن خواهد شد.

$$\dot{Q}_{\text{th, S.F}} = \dot{m}_{\text{HTF, S.F}} (h_{\text{out, S.F}} - h_{\text{in, S.F}}) \quad (2)$$

در رابطه (2)، $\dot{m}_{\text{HTF, S.F}}$ نرخ جرمی سیال انتقال گرما، $h_{\text{out, S.F}}$ و $h_{\text{in, S.F}}$ نیز بیان گر آنتالپی های ورودی و خروجی بوده که به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می شود [16].

2-2- معادلات حاکم بر بخش ذخیره ساز گرما

سیستم ذخیره ساز از نوع غیرمستقیم و شامل دو مخزن سرد و گرم نمک مذاب و یک دستگاه مبدل حرارتی برای مبادله انرژی گرمایی بین روغن میدان خورشیدی و نمک مذاب می باشد [14]. فرض می شود این مخازن کاملاً عایق بوده و هیچ گونه اتلاف انرژی از مخازن وجود ندارد [17]. معادلات توازن جرم و انرژی برای مخازن نمک مذاب در فرایند شارژ سیستم ذخیره سازی به صورت روابط (3) تا (6) خواهد بود. لازم به ذکر است که به منظور خلاصه نویسی، معادلات تنها برای شرایط شارژ ذکر می شود و به راحتی به شرایط دشارژ قابل تعمیم است.

$$M_{C, t+\Delta t} = M_{C, t} - \dot{m}_s \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$M_{H, t+\Delta t} = M_{H, t} + \dot{m}_s \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$M_{C, t+\Delta t} \cdot u_{C, t+\Delta t} - M_{C, t} \cdot u_C = -\dot{m}_s \cdot \Delta t \cdot h_{s, 2} \quad (5)$$

$$M_{H, t+\Delta t} \cdot u_{H, t+\Delta t} - M_{H, t} \cdot u_H = \dot{m}_s \cdot \Delta t \cdot h_{s, 1} \quad (6)$$

1- Logarithmic mean temperature difference

$$h_{\text{HTF},3''} = -18.34 + 1.498T_{\text{HTF},3''} + 0.00138T_{\text{HTF},3''}^2 \quad (24)$$

3-3-2- معادلات حاکم بر مبدل اکونومایزر

مشابه بخش سوپرهیتر می توان روابط (25) تا (29) را نوشت:

$$\dot{Q}_{\text{Ec}} = \dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}}(h_{\text{HTF},3''} - h_{\text{HTF},4}) \quad (25)$$

$$0.98\dot{Q}_{\text{Ec}} = \dot{m}_{\text{f},\text{w}}(h_{1'} - h_1) \quad (26)$$

$$\dot{Q}_{\text{Ec}} = (UA)_{\text{des},\text{Ec}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right)^{0.8} \Delta T_{\text{lm},\text{Ec}} \quad (27)$$

$$\Delta T_{\text{lm},\text{Ec}} = \frac{(T_{\text{HTF},3''} - T_{1'}) - (T_{\text{HTF},4} - T_1)}{\ln \left(\frac{(T_{\text{HTF},3''} - T_{1'})}{(T_{\text{HTF},4} - T_1)} \right)} \quad (28)$$

$$h_{\text{HTF},4} = -18.34 + 1.498T_{\text{HTF},4} + 0.00138T_{\text{HTF},4}^2 \quad (29)$$

مقدار افت فشار ایجاد شده در آب بعد از عبور از مبدل های بخش مولد بخار به صورت رابطه (30) خواهد بود. در این رابطه، K_p مقدار ثابتی است که از طریق اندازه گیری افت فشار در شرایط نامی تعیین می شود.

$$P_2 = P_1 - k_p(\dot{m}_{\text{f},\text{w}})^2 \quad (30)$$

4-3-2- معادلات حاکم بر توربین

روابط (31) تا (34) نشان دهنده معادلات حاکم بر عملکرد توربین می باشند. معادله (31) نشان گر رابطه میان راندمان آیزنتروپیک توربین (η_{turbine})، آنتالپی آب ورودی (h_2)، آنتالپی حقیقی آب خروجی (h_3) و آنتالپی خروجی در شرایط آیزنتروپیک ($h_{3,s}$) است.

$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3,s}} \quad (31)$$

در حالت کارکرد نیروگاه خارج از شرایط نامی، راندمان آیزنتروپیک توربین به صورت رابطه (32) تعیین می شود:

$$\eta_{\text{turbine}} = \eta_{\text{turbine,ref}} [1 - (0.19 - 0.41 \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right) + 0.218 \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right)^2)] \quad (32)$$

در شرایط عملکرد خارج از شرایط طراحی، توربین بخار با استفاده از روش فشار متغیر کنترل می گردد. در این روش دمای ورودی توربین تقریباً ثابت نگه داشته شده و فشار ورودی آن در شرایط بار جزئی کاهش پیدا می کند و افت فشار در توربین با استفاده از قانون استودلا و لوونشتین، تعیین می شود [4].

$$\frac{P_2^2 - P_3^2}{P_{2,\text{ref}}^2 - P_{3,\text{ref}}^2} = \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right)^2 \quad (33)$$

برای توان تولیدی توربین نیز داریم:

$$\dot{W}_{\text{turbine}} = \dot{m}_{\text{f},\text{w}}(h_2 - h_3) \quad (34)$$

5-3-2- معادلات حاکم بر کندانسور

از افت فشار در کندانسور صرف نظر شده، فشار کندانسور حدود 0/08 بار در نظر گرفته شده و فرض می شود که بخار چگالش یافته کندانسور را به صورت مایع اشباع ترک می نماید. بنابراین روابط (35) تا (37) به دست می آیند:

$$P_4 = P_3 \quad (35)$$

$$T_4 = T_{\text{sat}@P_4} \quad (36)$$

$$h_4 = h_{\text{f}@P_4} \quad (37)$$

6-3-2- معادلات حاکم بر پمپ

توان مصرفی پمپ بر حسب تفاوت آنتالپی های ورودی و خروجی به صورت

$$\Delta T_{\text{lm},\text{TES}} = \frac{(T_{\text{HTF},1} - T_{\text{s},1}) - (T_{\text{HTF},2} - T_{\text{s},2})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{HTF},1} - T_{\text{s},1})}{(T_{\text{HTF},2} - T_{\text{s},2})} \right)} \quad (11)$$

معادلات توازن جرم و انرژی برای محل های اتصال شاخه ها (نقاط A و B نشان داده شده در شکل 1) به صورت روابط (12) و (13) می باشد.

$$\dot{m}_{\text{HTF},\text{S},\text{F}} = \dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}} + \dot{m}_{\text{HTF},\text{TES}} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}} \cdot h_{\text{HTF},4} + \dot{m}_{\text{HTF},\text{TES}} \cdot h_{\text{HTF},2} = \dot{m}_{\text{HTF},\text{S},\text{F}} \cdot h_{\text{in},\text{S},\text{F}} \quad (13)$$

3-2- معادلات حاکم بر بخش تولید توان

انرژی گرمایی حاصل از میدان خورشیدی، در سیکل توان تبدیل به انرژی الکتریکی می شود. سیکل توان مورد استفاده در این نیروگاه، سیکل رانکین با توان اسمی 50 مگاوات الکتریکی می باشد. مولد بخار¹، توربین، کندانسور و پمپ، اجزای اصلی تشکیل دهنده این بخش می باشند. سیستم تولید بخار از سه مبدل حرارتی جریان مخالف اکونومایزر، سوپرهیتر و اواپراتور تشکیل شده است و انرژی گرمایی روغن را به آب انتقال می دهد.

1-3-2- معادلات حاکم بر مبدل سوپرهیتر

روابط (14) تا (17) نشان دهنده معادلات حاکم بر عملکرد سوپرهیتر می باشند [14].

$$\dot{Q}_{\text{S},\text{H}} = \dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}}(h_{\text{HTF},3} - h_{\text{HTF},3'}) \quad (14)$$

$$0.98\dot{Q}_{\text{S},\text{H}} = \dot{m}_{\text{f},\text{w}}(h_2 - h_{1''}) \quad (15)$$

در روابط (14) و (15)، $\dot{Q}_{\text{S},\text{H}}$ ، $\dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}}$ و $\dot{m}_{\text{f},\text{w}}$ به ترتیب نشان گر نرخ کلی انتقال گرما در مبدل سوپرهیتر، نرخ جرمی روغن ارسالی به بخش تولید توان و نرخ جرمی سیال عامل (آب) بخش تولید توان می باشند. $h_{\text{HTF},3}$ و $h_{\text{HTF},3'}$ نشان دهنده آنتالپی روغن در ورودی و خروجی سوپرهیتر و h_2 و $h_{1''}$ نشان گر آنتالپی آب در ورودی و خروجی سوپرهیتر می باشد. همچنین ضریب 0/98 بیان گر راندمان گرمایی بخش مولد بخار می باشد. در این بخش نیز عملکرد گرمایی مبدل توسط اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و ضریب کلی انتقال حرارت تعیین می شود.

$$\dot{Q}_{\text{S},\text{H}} = (UA)_{\text{des},\text{S},\text{H}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right)^{0.8} \Delta T_{\text{lm},\text{S},\text{H}} \quad (16)$$

$$\Delta T_{\text{lm},\text{S},\text{H}} = \frac{(T_{\text{HTF},3} - T_2) - (T_{\text{HTF},3'} - T_{1''})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{HTF},3} - T_2)}{(T_{\text{HTF},3'} - T_{1''})} \right)} \quad (17)$$

آنتالپی روغن، طبق روابط (18) و (19) تابعی از دما (برحسب درجه سلسیوس) بوده و آنتالپی آب با استفاده از روابط مربوط به مرجع [19] تعیین می شود.

$$h_{\text{HTF},3} = -18.34 + 1.498T_{\text{HTF},3} + 0.00138T_{\text{HTF},3}^2 \quad (18)$$

$$h_{\text{HTF},3'} = -18.34 + 1.498T_{\text{HTF},3'} + 0.00138T_{\text{HTF},3'}^2 \quad (19)$$

2-3-2- معادلات حاکم بر مبدل اواپراتور

مشابه بخش سوپرهیتر می توان روابط (20) تا (24) را نوشت:

$$\dot{Q}_{\text{Ev}} = \dot{m}_{\text{HTF},\text{BOP}}(h_{\text{HTF},3'} - h_{\text{HTF},3''}) \quad (20)$$

$$0.98\dot{Q}_{\text{Ev}} = \dot{m}_{\text{f},\text{w}}(h_{1''} - h_{1'}) \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{\text{Ev}} = (UA)_{\text{des},\text{Ev}} \left(\frac{\dot{m}_{\text{f},\text{w}}}{\dot{m}_{\text{f},\text{w},\text{des}}} \right)^{0.8} \Delta T_{\text{lm},\text{Ev}} \quad (22)$$

$$\Delta T_{\text{lm},\text{Ev}} = \frac{(T_{\text{HTF},3'} - T_{1''}) - (T_{\text{HTF},3''} - T_{1'})}{\ln \left(\frac{(T_{\text{HTF},3'} - T_{1''})}{(T_{\text{HTF},3''} - T_{1'})} \right)} \quad (23)$$

1- Steam generator, (SG)

رابطه (38) خواهد بود:

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}_{\text{f.w}}(h_1 - h_4) \quad (38)$$

توان مصرفی پمپ براساس بازده آیزنتروپیک آن عبارت است از:

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{m}_{\text{f.w}} \frac{v_f(P_1 - P_4)}{\eta_{\text{pump}}} \quad (39)$$

راندمان آیزنتروپیک پمپ در حالت کارکرد خارج از شرایط طراحی نیز به صورت رابطه (40) خواهد بود. در این رابطه e_{m_o} پارامتری بی بعد است که مقدار آن برای پمپ های دور متغیر (مورد نظر در مقاله حاضر) برابر $-0/4$ می باشد [17].

$$\frac{\eta_{\text{pump}}}{\eta_{\text{pump,ref}}} = e_{m_o} + 2(1 - e_{m_o}) \left(\frac{\dot{m}_{\text{f.w}}}{\dot{m}_{\text{f.w,des}}} \right) - (1 - e_{m_o}) \left(\frac{\dot{m}_{\text{f.w}}}{\dot{m}_{\text{f.w,des}}} \right)^2 \quad (40)$$

توان خالص تولیدی نیروگاه به صورت رابطه (41) تعیین می شود:

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{turbine}} - \dot{W}_{\text{pump}} \quad (41)$$

3- بهینه سازی (تعریف مساله و الگوریتم)

3-1- توابع هدف، قیود و متغیرهای تصمیم گیری

کار حاضر به بهینه سازی توابع هدف "حداکثر زمان های تولید توان" و "حداکثر سود حاصله" به صورت مجزا و همزمان می پردازد. تابع هدف اول در رابطه (42) نشان داده شده است. در این رابطه، J در شرایط فعال و غیرفعال بودن نیروگاه به ترتیب مقادیر 1 و 0 می گیرد. بنابراین حداکثر سازی تابع هدف نشان داده شده در رابطه (42) به منزله حداکثر سازی مدت زمان تولید است.

$$\max \sum_{t=1}^{24} J(t), \quad J = \begin{cases} 0 & \text{(نیروگاه در حالت خاموش)} \\ \text{یا} \\ 1 & \text{(نیروگاه در حالت روشن)} \end{cases} \quad (42)$$

تابع هدف دوم (مجموع سود حاصله) به شکل رابطه (43) تعریف می شود.

$$\max \sum_{t=1}^{24} Pr(t) \cdot \dot{W}_{\text{net}}(t) \quad (43)$$

ارزش برق در طول شبانه روز نیز به صورت رابطه (44) در نظر گرفته می شود [20].

$$Pr(t) = 27 + 15 \sin\left(\frac{2\pi t - 15.4\pi}{24}\right) \quad (44)$$

در مقاله حاضر، یک روز به 24 زیربازه زمانی یک ساعته تقسیم شده است. در هر زیربازه زمانی، نرخ جرمی روغن ارسالی به بخش تولید توان ($\dot{m}_{\text{HTF,BOP}}$) به عنوان متغیر تصمیم گیری انتخاب شده است. بنابراین در مجموع 24 متغیر تصمیم گیری وجود خواهد داشت. حداقل جرم مجاز نمک مذاب در مخزن گرم 40% ظرفیت مخزن گرم (27919 تن [14]) در نظر گرفته شده، همچنین محدوده مجاز توان خروجی نیروگاه بین 30 و 60 مگاوات در نظر گرفته شده است.

3-2- الگوریتم بهینه سازی

در مقاله حاضر از الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه سازی استفاده شده است. در این الگوریتم، جمعیتی از حل ها به صورت تصادفی ایجاد شده و نسل های بعدی بر پایه احتمال بقای بیشتر حل های بهتر تولید می گردد. اپراتورهای ژنتیک استفاده شده در این مقاله شامل انتخاب با استفاده از چرخ

رولت، ترکیب تک نقطه ای و جهش یکنواخت می باشند. معیار توقف الگوریتم، همگرایی 50 نسل متوالی به بهترین حل بدون تغییر بوده و احتمال ترکیب برابر 80% در نظر گرفته می شود.

بهینه سازی چندهدفه با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی نامغلوب¹ صورت می گیرد. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته ای از بهترین جواب ها را ارائه می دهد که با نام جبهه پارتو² شناخته می شوند. این دو عملگر عبارت اند از:

1. عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می دهد.
2. عملگری که تنوع جواب را در میان جواب های با رتبه برابر حفظ می کند.

در این الگوریتم به هر جواب یک رتبه اختصاص داده می شود که بر اساس تعداد مغلوب شدن آن ها نسبت به سایر نقاط انجام می شود. در پایان الگوریتم، نقاطی که بهترین رتبه یعنی رتبه 1 را دارا باشند به عنوان مجموعه جواب یا نقاط پارتوفرانانت انتخاب می شوند.

مراحل مختلف الگوریتم ژنتیک و نحوه عملکرد عملگرهای آن در مراجع [25-21] تشریح شده است.

4- اعتبارسنجی مدل سازی

برنامه کامپیوتری الگوریتم های مدل سازی و بهینه سازی توسط نویسندگان مقاله ایجاد شده است. در این بخش، مدل سازی حاضر از طریق مقایسه با نتایج موجود در مرجع [14] صحت سنجی می گردد. مقدار تابش های عمودی مستقیم حالت طراحی و نرخ جرمی روغن ارسالی به بخش تولید توان که 594 کیلوگرم بر ثانیه می باشد، به عنوان ورودی به سیستم دستگاه معادلات مدل سازی اعمال می شود. سایر داده های مورد نیاز در جدول 1 آورده شده اند. نتایج حاصل از مدل سازی حاضر و نتایج ارائه شده در مرجع [14]، (هر دو مربوط به شرایط طراحی) در جدول 2 مقایسه شده است. این مقایسه تطابق مناسبی را نشان می دهد. از دلایل تفاوت محسوس تر میان مدل سازی حاضر و مرجع [14] در مورد توان گرمایی بخش تولید بخار می توان به نادیده گرفتن مولفه های فرعی موجود در آن (از جمله بخش باز گرمایش) در مدل سازی حاضر اشاره کرد.

پارامتر ضریب خورشیدی³ در جدول 2 به صورت نسبت توان گرمایی حاصل از میدان خورشیدی به توان گرمایی ارسال شده به بخش تولید توان در شرایط طراحی تعریف می شود.

5- بحث بر روی نتایج

5-1- نتایج به ازای شرایط بدون وجود سیستم ذخیره سازی گرمایی

در شرایطی که نیروگاه بدون سیستم ذخیره سازی گرمایی در نظر گرفته شود، کل انرژی گرمایی حاصل از میدان خورشیدی به بخش تولید توان ارسال می شود. در این شرایط در زمان هایی که تابش خورشیدی موجود می باشد تولید توان صورت گرفته ولی در زمان های فقدان تابش (یا شرایطی که تابش کمتر از حداقل مجاز است) توانی تولید نمی شود.

1- Non-dominated sorting Genetic Algorithm, (NSGA II)
2- Pareto front
3- Solar multiple

جدول 1 اطلاعات ورودی جهت مدل‌سازی نیروگاه [4, 14]

عنوان	نماد	مقدار
تابش عمودی مستقیم در شرایط طراحی (Wm^{-2})	DNI	850
دمای خروجی روغن میدان خورشیدی ($^{\circ}C$)	$T_{out,S,F}$	390
دمای مخزن سرد ($^{\circ}C$)	T_C	292
دمای مخزن گرم ($^{\circ}C$)	T_H	386
ضریب انتقال حرارت کلی در مساحت مبدل بخش ذخیره انرژی گرمایی (MWK^{-1})	$(UA)_{des,TES}$	35
دبی جرمی روغن بخش ذخیره انرژی گرمایی (kgs^{-1})	$\dot{m}_{HTF,TES,des}$	611/1
ضریب انتقال حرارت کلی در مساحت مبدل سوپرهیتر در شرایط طراحی (kWK^{-1})	$(UA)_{des,S,H}$	411/8
ضریب انتقال حرارت کلی در مساحت مبدل اواپراتور در شرایط طراحی (kWK^{-1})	$(UA)_{des,Ev}$	2855/5
ضریب انتقال حرارت کلی در مساحت مبدل اکونومایزر در شرایط طراحی (kWK^{-1})	$(UA)_{des,Ec}$	514/8
راندمان گرمایی بخش مولد بخار (%)	η_{SG}	98
افت فشار کلی بخش مولد بخار در شرایط طراحی (bar)	ΔP_{SG}	4/5
دبی جرمی آب تغذیه در مولد بخار در شرایط طراحی (kgs^{-1})	$\dot{m}_{f,w,des}$	64/32
راندمان توربین در شرایط طراحی (%)	$\eta_{turbine,ref}$	87/5
فشار بخار ورودی توربین در شرایط طراحی (bar)	P_2	90
دمای بخار ورودی توربین ($^{\circ}C$)	T_2	370
فشار عملکرد کندانسور (bar)	P_3	0/08
راندمان پمپ در شرایط طراحی (%)	$\eta_{pump,ref}$	75
پارامتر بی‌بعد تعیین‌کننده شکل منحنی پمپ	e_{mo}	-0/4

مقایسه‌ای میان توان گرمائی حاصل از میدان خورشیدی، توان حرارتی انتقالی به بخش مولد بخار و توان خالص الکتریکی تولیدی، در کنار میزان تابش ورودی، در شکل 2 انجام پذیرفته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، توان حرارتی انتقالی به بخش تولید توان، به‌دلیل بازده 98% در نظر گرفته شده برای مولد بخار، اندکی از توان حرارتی تولیدی در میدان خورشیدی کمتر است. همچنین، دلیل تفاوت میان توان حرارتی انتقالی به بخش مولد بخار و توان الکتریکی تولیدی، تلفات موجود در سیکل بخار (از جمله توربین و پمپ) است.

در شرایط عدم وجود سیستم ذخیره‌سازی گرمایی، سود روزانه حاصله و مجموع زمان‌های تولید به‌ترتیب 24772 دلار و 12 ساعت بوده است.

5-2- نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه با اعمال تابع هدف اول (حداکثر مدت زمان تولید روزانه)

در این بخش، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با تابع هدف حداکثر مدت زمان تولید ارائه و بررسی می‌گردد. به‌منظور دستیابی به حل مناسب، مقادیر متفاوتی از جمعیت هر نسل (100، 150، 200)، و نرخ جهش (1%، 3% و 5%)، مورد آزمون قرار گرفت و در نهایت جمعیت 150 و نرخ جهش 3% به عنوان عملگرهای مناسب الگوریتم ژنتیک انتخاب شد.

شکل 3 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی در کنار مقدار تابش خورشیدی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 3 می‌توان دریافت که نیروگاه، در بیشتر ساعات روز (19 ساعت) حتی در زمان‌های فقدان تابش‌های خورشیدی (ساعات 20 تا 24) نیز تولید توان داشته است. این امر می‌تواند

جدول 2 مقایسه نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج عددی مرجع [14]

پارامترهای اصلی نیروگاه	نتایج مرجع [14]	نتایج حاصله	درصد تفاوت
توان گرمایی حاصل از میدان خورشیدی (MW_{th})	293/80	293/84	0/0
دبی جرمی روغن میدان خورشیدی (kgs^{-1})	1205/1	1208/2	0/25
توان گرمایی سیستم ذخیره‌سازی (MW_{th})	140	141	0/7
توان گرمایی بخش تولید بخار (MW_{th})	140/1	150/0	7/0
توان خالص (MW_{el})	51/4	49/2	4/2
ضریب خورشیدی	2/03	1/92	5/4

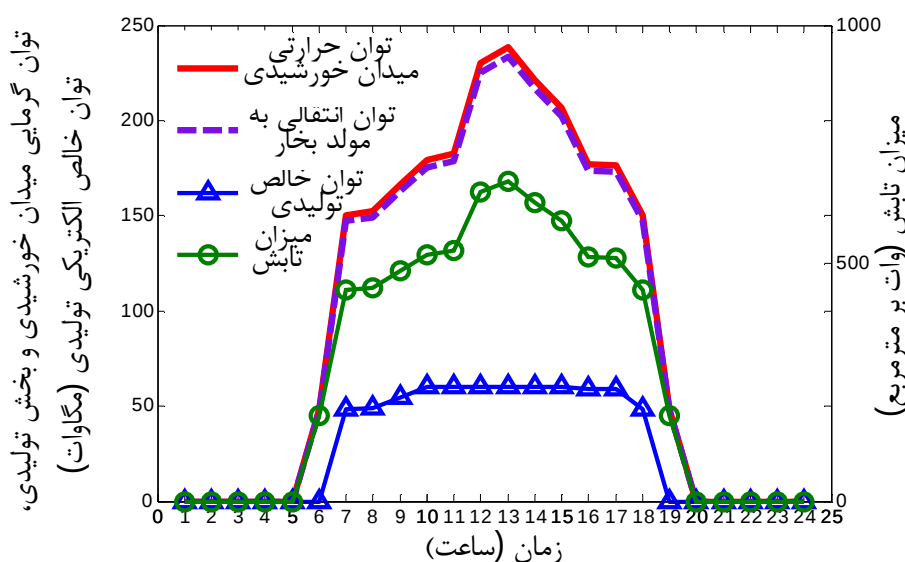
دستآورد مهمی در جهت پایداری بیشتر تولید برق باشد. این در حالی است که در شرایط بدون سیستم ذخیره‌ساز گرما (بخش 5-1) تولید توان تنها در 12 ساعت صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که توان‌های نسبتاً پایین (کارکرد در شرایط بار جزئی) در شکل 3 به این علت است که تولید بتواند در زمان‌های بیشتری صورت پذیرد.

شکل 4 نیز نمودار تغییرات بهینه جرم نمک مذاب مخازن گرم و سرد را نشان می‌دهد. در این شکل، روند صعودی و نزولی جرم درون مخزن گرم، به‌ترتیب نشان‌دهنده فرایندهای شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌سازی گرمایی می‌باشد. مطابق شکل 4 در بازه زمانی اواسط روز که تابش‌های خورشیدی موجود می‌باشد، سیستم ذخیره‌سازی شارژ شده و جرم نمک مذاب مخزن گرم افزایش یافته است. در بازه زمانی اواخر روز که تابش وجود ندارد، انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌سازی تخلیه شده و به بخش تولید توان ارسال می‌شود تا تولید به‌صورت پیوسته انجام گیرد. قرینه بودن منحنی‌ها در شکل 4 به این دلیل است که مجموع جرم نمک موجود در دو مخزن ثابت است و نمک مذاب تنها بین دو مخزن مبادله می‌شود.

5-3- نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه با اعمال تابع هدف دوم (حداکثر سود حاصله)

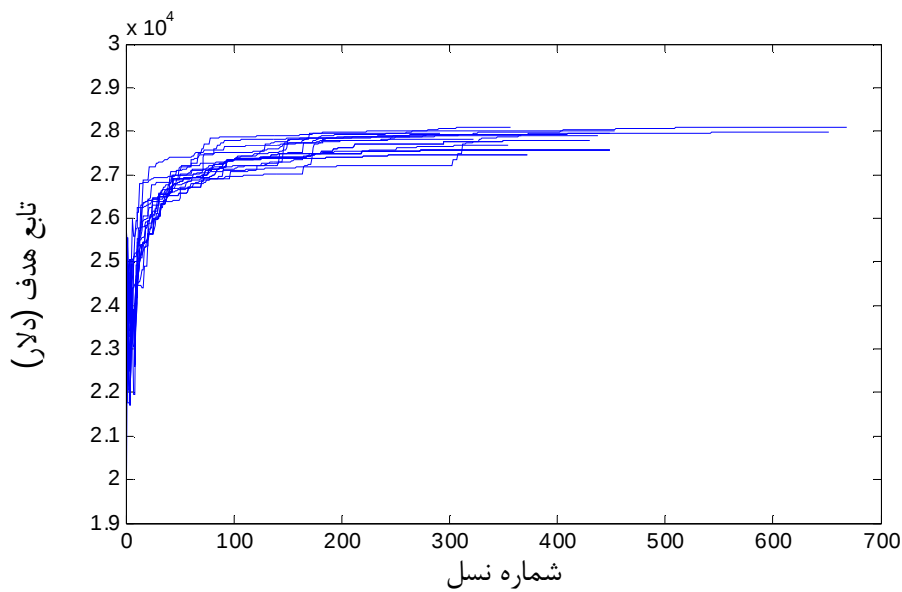
در این بخش، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با هدف حداکثر سود حاصله مورد بحث قرار می‌گیرد.

شکل 5 منحنی همگرایی تابع هدف در اجراهای مختلف (به ازای نرخ جهش 3% و جمعیت 150) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج نهایی اجراهای مختلف انحراف غیر قابل قبولی را نشان نمی‌دهند. لازم به ذکر است که نمودار مشابهی برای بخش (5-2) وجود

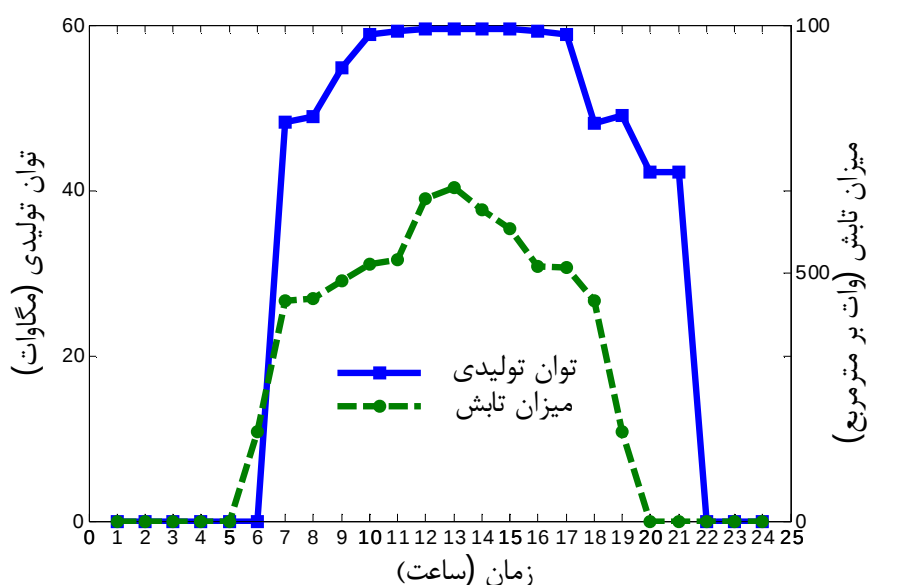


شکل 2 مقایسه توان گرمائی حاصل از میدان خورشیدی، توان حرارتی انتقالی به مولد بخار و توان خالص الکتریکی تولیدی، در شرایط نیروگاه بدون سیستم ذخیره‌سازی گرما

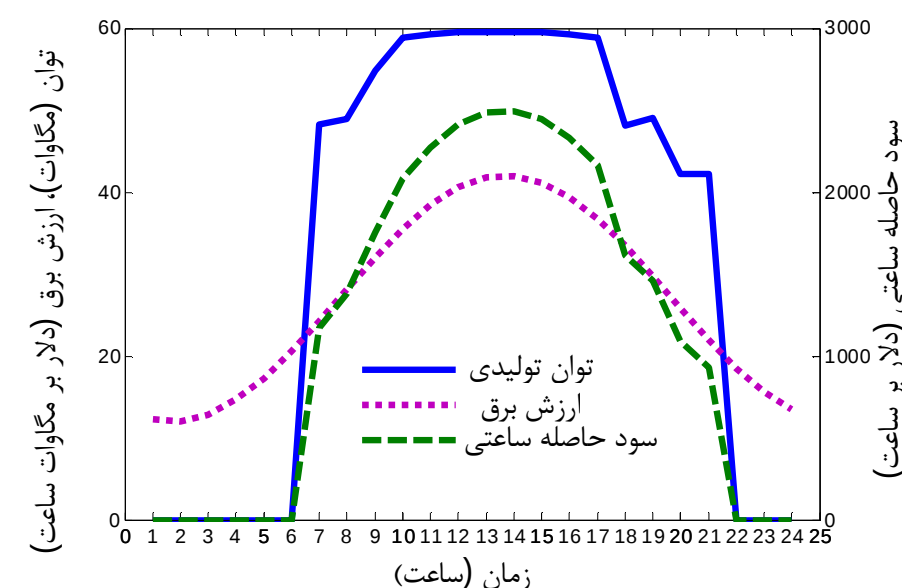
شکل 9 نمونه‌ای از جبهه‌های بهینه به‌دست آمده به ازای جمعیت 150 و احتمال جهش 3% را نشان می‌دهد. جبهه به‌دست آمده در آخرین نسل به‌عنوان جبهه بهینه نهایی در نظر گرفته شده و نزدیک‌ترین نقطه به نقطه ایده‌ال به عنوان نقطه بهینه نهایی معرفی می‌شود. نقطه ایده‌ال نقطه‌ای فرضی می‌باشد که مختصات آن در جهت محور افقی بهترین تابع هدف اول (بیشترین زمان تولید) از بین تمامی حل‌ها، و مختصات آن در جهت محور عمودی بهترین تابع هدف دوم (بیشترین سود) از بین تمامی حل‌ها می‌باشد. نقاط "الف"، "ب" و "ج" در شکل 9 جبهه بهینه پارتو نهایی را تشکیل می‌دهند که بهترین جواب‌ها هستند. این مجموعه جواب‌ها برتری نسبت به



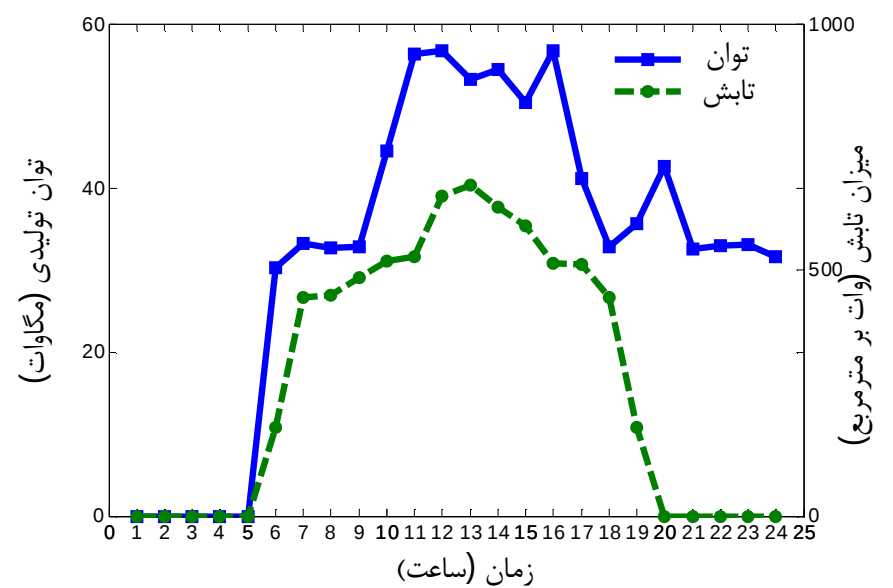
شکل 5 همگرایی الگوریتم ژنتیک به ازای اجراهای مختلف (تابع هدف حداکثر سود حاصله)



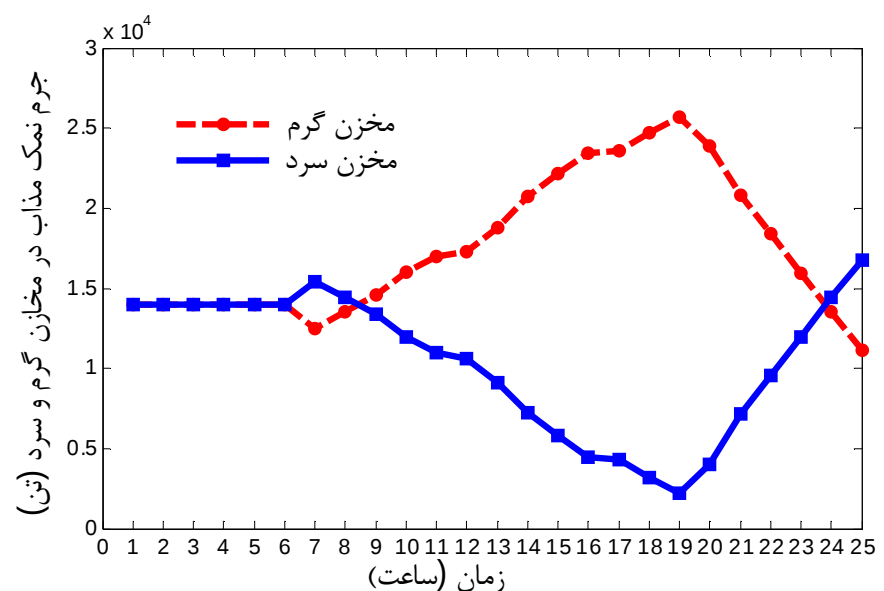
شکل 6 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی نیروگاه در کنار مقدار تابش خورشیدی (تابع هدف حداکثر سود حاصله)



شکل 7 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی و سود حاصله ساعتی در کنار ارزش برق (تابع هدف حداکثر سود حاصله)



شکل 3 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی نیروگاه در کنار میزان تابش خورشیدی (تابع هدف حداکثر مدت زمان تولید)



شکل 4 تغییرات زمانی بهینه جرم نمک درون مخازن (تابع هدف حداکثر مدت زمان تولید)

دارد که از تکرار آن خودداری شده است.

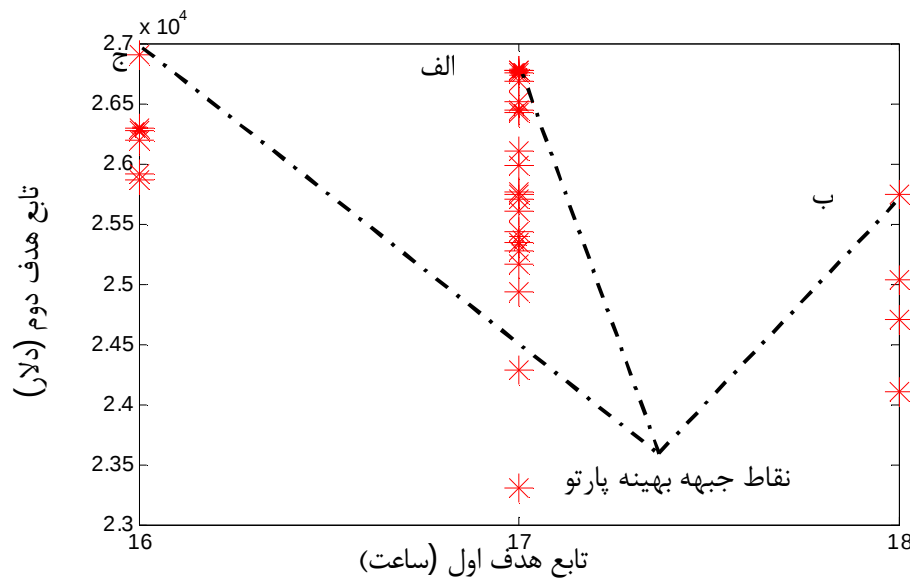
شکل 6 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی در کنار مقدار تابش خورشیدی را نشان می‌دهد. همچنین تغییرات بهینه توان تولیدی در کنار ارزش برق و سود حاصله ساعتی در شکل 7 نشان داده شده است. مطابق شکل 7، به منظور دستیابی به حداکثر سود، در زمان‌های با ارزش بالاتر الکتریسیته، تولید توان بیشتری صورت گرفته است. ضمناً از نیروگاه (از جمله مبدل‌ها و توربوماشین‌ها) در شرایط بار جزئی افت می‌نماید، فعالیت در توان بالاتر (کارکرد در بار کامل) مزیت بالاتر بودن کارایی حرارتی نیروگاه را نیز به همراه دارد.

شکل 8 نیز نشان‌گر نمودار تغییرات بهینه جرم نمک مذاب مخازن گرم و سرد می‌باشد که در آن زمان‌های شارژ و دشارژ مخزن گرم قابل مشاهده است. در واقع این نحوه شارژ و دشارژ مخازن، منجر به تولید نشان داده شده در شکل 7 شده است.

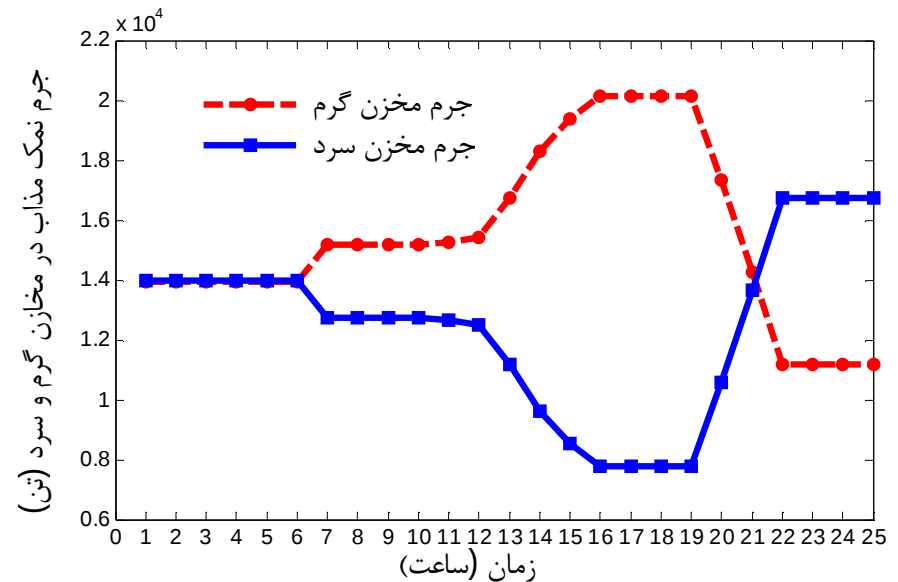
در این شرایط (یعنی با اعمال تابع هدف حداکثر سود حاصله) مقدار سود حاصله روزانه برابر با 28092/2 دلار و حدود 13/5 درصد از شرایط بدون سیستم ذخیره‌ساز گرما (بخش 5-1) بیشتر است.

4-5- نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه

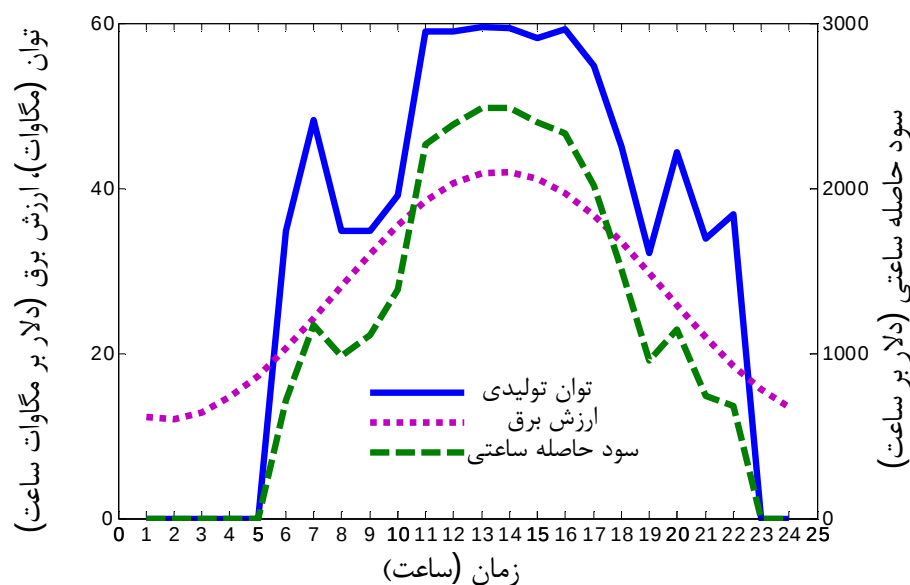
در این بخش، نتایج بهینه‌سازی هم‌زمان توابع هدف حداکثر مدت زمان تولید و حداکثر سود حاصله ارائه و تحلیل می‌گردد.



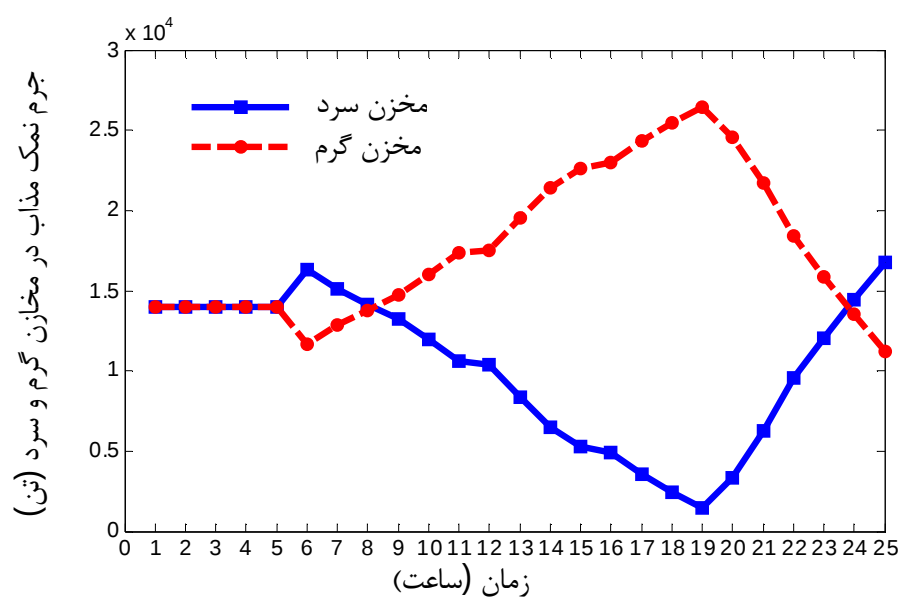
شکل 9 جبهه پارتو در بهینه سازی دوهدفه



شکل 8 تغییرات زمانی بهینه جرم نمک درون مخازن (تابع هدف حداکثر سود حاصله)



شکل 10 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی در کنار سود حاصله ساعتی و ارزش برق (بهینه سازی دو هدفه)



شکل 11 تغییرات زمانی بهینه جرم نمک مذاب درون مخازن (بهینه سازی دو هدفه)

$$crf = \frac{I \cdot (1 + I)^n}{(1 + I)^n - 1} \quad (46)$$

در رابطه (46)، n عمر سیستم به سال و I نرخ سود بانکی است. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای اقتصادی در جدول 4 نشان داده شده است.

با توجه به جدول 3، هزینه های تراز شده حالت سوم (بهینه سازی با هدف حداکثر سود حاصله) کمترین مقدار را داراست، همچنین، مشاهده می شود که هزینه تراز شده انرژی در مقایسه هزینه تراز شده نیروگاه های سنتی (در حدود 70 الی 140 دلار برمگاوات ساعت) هنوز بالاست، البته،

یکدیگر ندارند و به اصطلاح غیر غالب اند و هر یک از این نقاط این پتانسیل را دارند تا به عنوان نقطه بهینه نهایی معرفی شوند. نقطه "الف" به دلیل اینکه نزدیک ترین نقطه به نقطه ایده آل می باشد، به عنوان نقطه بهینه نهایی انتخاب می شود.

شکل 10 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی نیروگاه را در کنار سود حاصله ساعتی و ارزش برق نشان می دهد. مطابق نمودارهای موجود در این شکل، همزمان با حداکثر سود، حداکثر پایداری تولید نیز مدنظر قرار گرفته و به جز در ساعاتی با میزان ارزش برق پایین، در بقیه ساعات تولید توان صورت پذیرفته است. شکل 11 نیز میزان تغییرات زمانی بهینه جرم نمک مذاب مخازن گرم و سرد را نشان می دهد. در واقع این نحوه شارژ و دشارژ مخازن، منجر به توان تولیدی نشان داده شده در شکل 10 شده است.

5-5- مقایسه نتایج حاصله

در این بخش نتایج حاصله از بخش های پیشین مورد مقایسه قرار می گیرند. این مقایسه در جدول 3 صورت پذیرفته است. مطابق این جدول، نیروگاه با سیستم ذخیره ساز با تابع هدف حداکثر زمان تولید نسبت به نیروگاه بدون ذخیره ساز، به میزان 7 ساعت، مدت زمان تولید بیشتری را دارا می باشد.

همچنین نیروگاه با سیستم ذخیره ساز، با تابع هدف حداکثر سود نسبت به نیروگاه بدون ذخیره ساز، 13/5% سود بیشتری را نشان می دهد. و در نهایت، نیروگاه با سیستم ذخیره ساز با اهداف همزمان حداکثر سود و حداکثر زمان تولید، نسبت به نیروگاه بدون ذخیره ساز، 5 ساعت مدت زمان تولید بالاتر، و 8/1% سود بیشتری را نشان می دهد.

همان طور که بحث شد، توجه مقاله حاضر معطوف بر بهینه سازی عملکرد روزانه یک نیروگاه موجود با اهداف حداکثر سود حاصله از فروش الکتریسیته و پایداری تولید است. در واقع در مساله حاضر سخت افزار ثابت بوده و تنها به بهینه سازی عملکرد پرداخته شده است. اما به عنوان یک ارزیابی و تخمین، هزینه تراز شده انرژی نیز به ازای هر مورد محاسبه و در جدول 3 نشان داده شده است.

هزینه تراز شده انرژی به صورت رابطه (45) تعریف می گردد که در آن C_{inv} هزینه سرمایه گذاری کل، C_{OM} هزینه سالیانه تعمیرات و نگهداری، E_t کل انرژی تولیدی سالیانه و در نهایت crf ضریب بازگشت سرمایه بوده که به شکل رابطه (46) تعریف می شود.

$$LCOE = \frac{crf \cdot C_{inv} + C_{OM}}{E_t} \quad (45)$$

جدول 3 مقایسه نتایج حاصله		آنتالپی (Jkg^{-1})	
حالت	مدت زمان تولید (ساعت)	سود حاصله (دلار)	هزینه تراز شده انرژی (دلار بر مگاوات ساعت)
شرایط بدون سیستم ذخیره ساز گرما	12	24772/0	185/6
بهینه سازی با اعمال تابع هدف اول (حداکثر زمان تولید)	19	25293/9	188/3
بهینه سازی با اعمال تابع هدف دوم (حداکثر سود)	15	28092/2	183/9
بهینه سازی با اعمال همزمان دو تابع هدف	17	26773/1	186/6
جدول 4 مقادیر پارامترهای اقتصادی [26]		علایم یونانی	
هزینه سرمایه گذاری نیروگاه با سیستم ذخیره سازی (دلار بر کیلووات)	8000	η	راندمان
هزینه سرمایه گذاری نیروگاه بدون سیستم ذخیره سازی (دلار بر کیلووات)	6800	زیر نویس ها	
هزینه تعمیرات و نگهداری (دلار بر کیلووات ساعت)	0/04	BOP	بخش تولید توان
نرخ سود بانکی	10%	C	مخزن نمک مذاب سرد
عمر سیستم (سال)	30	des	نقطه طراحی
		Exch	مبدل
		Ec	اکونومایزر
		Ev	اواپراتور
		f	حالت مایع اشباع
		f.w	آب سیکل توان
		H	مخزن نمک مذاب گرم
		HTF	سیال انتقال گرما (روغن)
		Im	لگاریتمی
		ref	حالت مرجع
		s	نمک مذاب
		sat	حالت اشباع
		S.F	میدان خورشیدی
		S.H	سوپرهیتر
		TES	سیستم ذخیره سازی گرمایی
		th	گرمایی

هزینه تراز شده وابستگی زیادی به پارامترهای اقتصادی دارد و روند ذکر شده بدون پیچیدگی اضافی قابل پیاده سازی برای مقادیر دیگر پارامترهای اقتصادی می باشد.

6- نتیجه گیری و جمع بندی

در مقاله حاضر، مدلی حرارتی و یکپارچه برای مدل سازی شبه پایای عملکرد نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره ساز گرما ارائه گردید. پس از اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از آن به عنوان زیر برنامه برای بهینه سازی عملکرد روزانه یک نیروگاه با اهداف "حداکثر زمان های تولید" و "حداکثر سود حاصله" استفاده شد.

نتیجه حل بهینه با هدف حداکثر مدت زمان تولید (حداکثر پایداری تولید) حاکی از آن است که با استفاده از سیستم ذخیره ساز گرما، امکان تولید در زمان های بدون تابش و بنابراین افزایش مدت زمان عملکرد نیروگاه و پایداری تولید حاصل خواهد شد.

همچنین نتایج حاصل از بهینه سازی تک هدفه با هدف افزایش سود حاصله نشان می دهد که سیستم ذخیره سازی از طریق ذخیره انرژی در زمان های با ارزش پایین الکتریسیته و استفاده از آن در جهت تولید توان حداکثری در شرایط با ارزش بالای الکتریسیته منجر به افزایش سود حاصله می شود.

نتایج حاصل از بهینه سازی چندهدفه نیز بیان گر آن است که با ایجاد توازن میان دو تابع هدف، امکان دستیابی به سود و پایداری مناسب به صورت همزمان، میسر خواهد شد.

7- فهرست علایم

C_p	گرمای ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
DNI	تابش گرمایی مستقیم خورشیدی (Wm^{-2})
e_{mo}	پارامتر بی بعد منحنی پمپ

8- مراجع

- [1] T. M. Pavlović, I. S. Radonjić, D. D. Milosavljević, L. S. Pantić, A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 6, pp. 3891-3902, 2012.
- [2] T. Larraín, R. Escobar, Net energy analysis for concentrated solar power plants in northern Chile, *Renew Energy*, Vol. 41, No. 0, pp. 123-133, 2012.
- [3] R. Dominguez, L. Baringo, A. J. Conejo, Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant, *Applied Energy*, Vol. 2, No. 98, pp. 316-325, 2012.
- [4] M. J. Montes, A. Abánades, J. M. Martínez-Val, M. Valde's, Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors, *Solar Energy*, Vol. 83, No.12, pp. 2165-2176, 2009.
- [5] E. Lizarraga-Garcia, A. Gobeity, M. Totten, A. Mitsos, Optimal operation of a solar-thermal power plant with energy storage and electricity buy-back from grid, *Energy*, Vol. 51, No. 0, pp. 61-70, 2013.
- [6] L. Martín, M. Martín, Optimal year-round operation of a concentrated solar energy plant in the south of Europe, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 627-633, 2013.
- [7] C. Kost, C. M. Flath, D. Möst, Concentrating solar power plant investment

- [15] Satel-light, 2008; <http://www.satel-light.com>.
- [16] Staff report, *Technical bulletin 7239115C*, Solutia, 2008; <http://www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp>.
- [17] A. M. Patnode, *Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants*, PhD thesis, University of Wisconsin-Madison, USA, 2006.
- [18] R. Ferri, A. Cammi, D. Mazzei, Molten salt mixture properties in RELAP5 code for thermodynamic solar applications, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 12, pp. 1676-1687, 2008.
- [19] Staff report, *Release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam*, The International Association for the Properties of Water and Steam, 1997.
- [20] G. Zhao, M. Davison, Optimal control of hydroelectric facility incorporating pump storage, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 4, pp. 1064-1077, 2009.
- [21] J. Mahmoudimehr, S. Sanaye, Minimization of Fuel Consumption of Natural Gas Compressor Stations with Similar and Dissimilar Turbo-Compressor Units, *ASCE*, Vol. 140, No. 0, pp. 1-9, 2014.
- [22] M. Gen, R. Cheng, *Genetic algorithms and engineering optimization*, New York: Wiley, 2000.
- [23] X. Yu, M. Gen, *Introduction to Evolutionary Algorithms*, Springer, 2010; <http://www.springer.com/978-1-84996-128-8>
- [24] K. Deb, *Multi objective optimization using evolutionary algorithms*, 1st Edition, pp. 13-45, New York: Wiley, 2001.
- [25] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont, D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, Second Edition, pp. 61-123, New York: Springer, 2002.
- [26] IEA. *World energy outlook*. Paris: IEA Press; 2007.
- and operation decisions under different price and support mechanisms, *Energy Policy*, Vol. 61, No. 0, pp. 238-248, 2013.
- [8] A. Baghernejad, M. Yaghoubi, Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 5, pp. 2193-2203, 2011.
- [9] J. M. Cabello, J. M. Cejudo, M. Luque, F. Ruiz, K. Deb, R. Tewari, Optimization of the size of a solar thermal electricity plant by means of genetic algorithms, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 11, pp. 3146-3153, 2011.
- [10] R. Soltani, K. P. Mohammadzadeh, M. Vahdati, M. H. KhoshgoftarManesh, M. A. Rosen, M. Amidpour, Multi-objective optimization of a solar-hybrid cogeneration cycle: Application to CGAM problem, *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, No. 0, pp. 60-71, 2014.
- [11] R. Silva, M. Berenguel, M. Pérez, A. Fernández-Garcia, Thermo-economic design optimization of parabolic trough solar plants for industrial process heat applications with Genetic algorithms, *Applied Energy*, Vol. 113, No. 0, pp. 603-614, 2014.
- [12] V. Mehrnia, R. Haghighi Khoshkhoo, solar field thermo-economical optimization of Yazd integrated solar combined cycle (ISCC), *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 117 - 127, 2014. (In Persian)
- [13] R. Haghighi Khoshkhoo, A. A. Fazli, Modeling of a solar power plant with storage system in Yazd location, in *The 27th International Power System Conference*, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [14] A. Rovira, M. J. Montes, M. Valdes, J. M. Martínez-Val, Energy management in solar thermal power plants with double thermal storage system and subdivided solar field, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 11, pp. 4055-4066, 2011.