



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

وحید خلیل زاده باویل<sup>1</sup>، جواد محمودی مهر<sup>2\*</sup>

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 تمرکزی<sup>1</sup> از مناسب ترین فن آوری 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 عمر<sup>4</sup> 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-1<sup>5</sup> واقع در گرانا 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-سهموی<sup>6</sup> بوده که تابش خورشیدی را به صورت متمرکز شده به سیال انتقال گرما<sup>7</sup>، که نوعی روغن با پایداری گرمایی بالا می‌باشد، انتقال می‌دهد. در نیروگاه تحت بررسی، انرژی گرمایی جذب‌شده با تابش عمودی مستقیم<sup>8</sup> 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 انرژی<sup>1</sup>، به مقایسه چند نیروگاه خورشیدی با اندازه میدان خورشیدی<sup>2</sup> 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 غیرخطی<sup>3</sup> 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

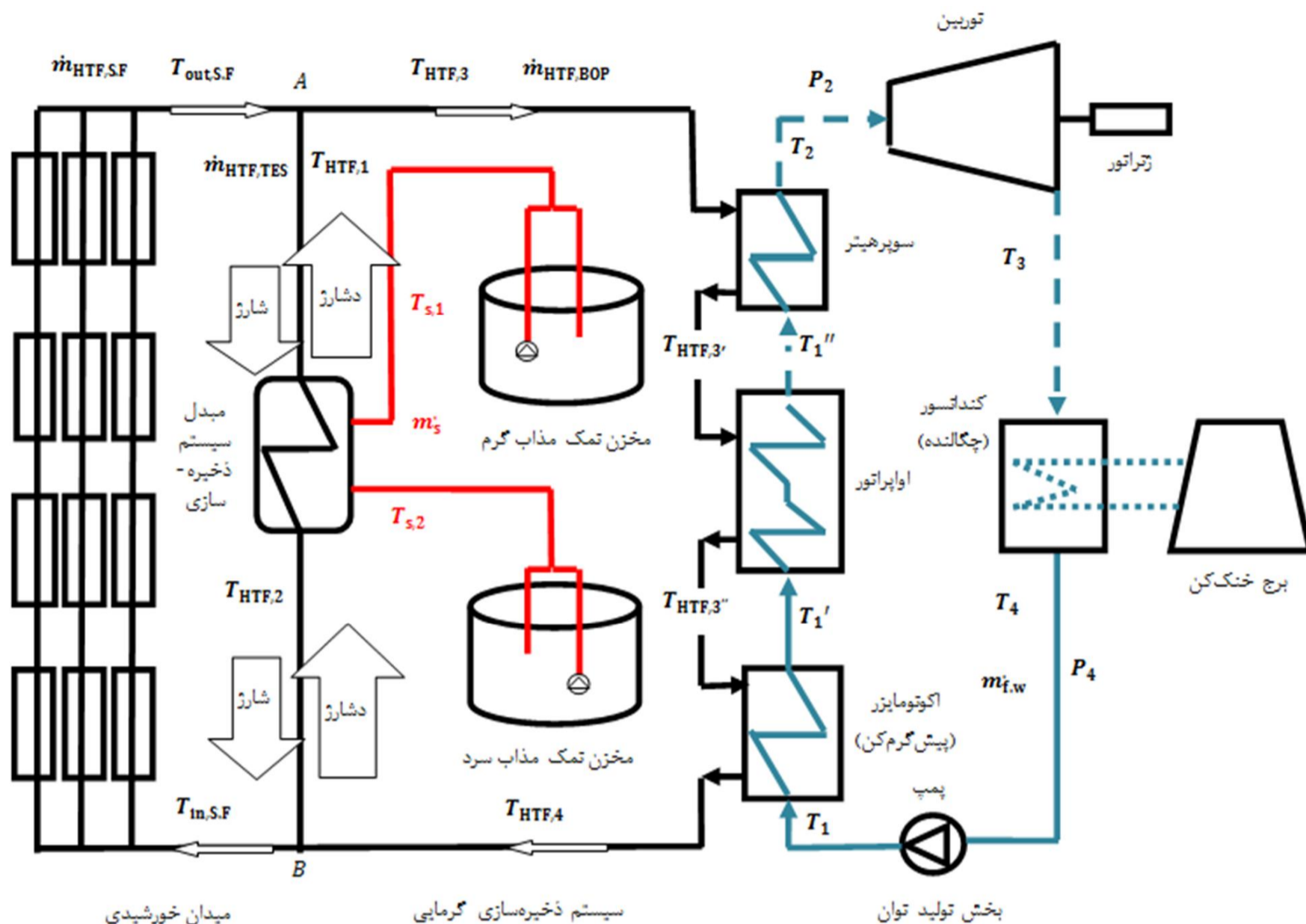
7- Heat Transfer Fluid, (HTF)

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 نشان‌دهنده جرم نمک مذاب موجود در مخزن، انرژی داخلی و آنتالپی نمک مذاب می‌باشد. زیرنویس‌های  $C$  و  $H$  نمایان گر مخازن سرد و گرم، زیرنویس‌های  $t$  و  $t + \Delta t$  نشان‌دهنده دو زیربازه زمانی متوالی و زیر نویس‌های  $1$  و  $2$  به ترتیب نشان‌گر شرایط ورودی و مخزن گرم و خروجی از مخزن سرد می‌باشند. در معادلات قبل، آنتالپی و انرژی داخلی به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شده و طبق رابطه (7) با انتگرال‌گیری از گرمای ویژه از دمای مرجع اختیاری  $220$  درجه سلسیوس تا دمای مورد نظر حاصل می‌شود [18].

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

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 می‌باشد. عملکرد گرمایی مبدل حرارتی، طبق رابطه (10)، توسط اختلاف دمای متوسط لگاریتمی<sup>1</sup> و ضریب کلی انتقال حرارت آن تعیین می‌شود.

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

در فرایند شارژ سیستم ذخیره‌سازی گرمایی، اختلاف دمای متوسط لگاریتمی از رابطه (11) به دست می‌آید:

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

مقادیر تابش خورشیدی برای موقعیت‌های مختلف و برای بازه‌های نیم‌ساعته در مرجع [15] موجود می‌باشد. 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 بیان‌گر آنتالپی‌های ورودی و خروجی بوده که به صورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود [16].

## 2-2- معادلات حاکم بر بخش ذخیره‌ساز گرما

سیستم ذخیره‌ساز 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 می‌باشد [14]. فرض می‌شود این مخازن کاملاً عایق بوده و هیچ‌گونه اتلاف انرژی از مخازن وجود ندارد [17]. معادلات توازن جرم و انرژی برای مخازن نمک مذاب در فرایند شارژ سیستم ذخیره‌سازی به صورت روابط (3) تا (6) خواهد بود. لازم به ذکر است که به منظور خلاصه‌نویسی، معادلات تنها برای شرایط شارژ ذکر می‌شود 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 می‌توان روابط (25) تا (29) را نوشت:

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

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

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

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

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

مقدار افت فشار ایجاد شده در آب بعد از عبور از مبدل‌های بخش مولد بخار به صورت رابطه (30) خواهد بود. در این رابطه،  $K_p$  مقدار ثابتی است که از طریق اندازه‌گیری افت فشار در شرایط نامی تعیین می‌شود.

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

## 4-3-2- معادلات حاکم بر توربین

روابط (31) تا (34) نشان‌دهنده معادلات حاکم بر عملکرد توربین می‌باشند. معادله (31) نشان‌گر رابطه میان راندمان آیزنتروپیک توربین ( $\eta_{\text{turbine}}$ )، 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 می‌شود:

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

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

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

برای توان تولیدی توربین نیز داریم:

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

## 5-3-2- معادلات حاکم بر کندانسور

از افت فشار در کندانسور صرف‌نظر شده، فشارکندانسور حدود 0/08 بار در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که بخار چگالش‌یافته کندانسور را به صورت مایع اشباع ترک می‌نماید. بنابراین روابط (35) تا (37) به دست می‌آیند:

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

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

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

## 6-3-2- معادلات حاکم بر پمپ

توان مصرفی پمپ بر حسب تفاوت آنتالپی‌های ورودی و خروجی به صورت

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

معادلات توازن جرم و انرژی برای محل‌های اتصال شاخه‌ها (نقاط A و B نشان‌داده شده در شکل 1) به صورت روابط (12) و (13) می‌باشد.

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

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

## 3-2- معادلات حاکم بر بخش تولید توان

انرژی گرمایی حاصل از میدان خورشیدی، در سیکل توان تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. سیکل توان مورد استفاده در این نیروگاه، سیکل رانکین با توان اسمی 50 مگاوات الکتریکی می‌باشد. مولد بخار<sup>1</sup>، توربین، کندانسور و پمپ، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این بخش می‌باشند. سیستم تولید بخار از سه مبدل حرارتی جریان مخالف اکونومایزر، سوپرهیتر و اواپراتور تشکیل شده است و انرژی گرمایی روغن را به آب انتقال می‌دهد.

## 1-3-2- معادلات حاکم بر مبدل سوپرهیتر

روابط (14) تا (17) نشان‌دهنده معادلات حاکم بر عملکرد سوپرهیتر می‌باشند [14].

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

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

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

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

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

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 می‌شود.

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

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

## 2-3-2- معادلات حاکم بر مبدل اواپراتور

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

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

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

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

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

1- Steam generator, (S.G)

رابطه (38) خواهد بود:

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

توان مصرفی پمپ براساس بازده آیزنتروپیک آن عبارت است از:

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

راندمان آیزنتروپیک پمپ در حالت کارکرد خارج از شرایط طراحی نیز به صورت رابطه (40) خواهد بود. در این رابطه پارامتری بی‌بعد است که مقدار آن برای پمپ‌های دور متغیر (مورد نظر در مقاله حاضر) برابر  $-0/4$  می‌باشد [17].

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

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

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

### 3- بهینه‌سازی (تعریف مساله و الگوریتم)

#### 3-1- توابع هدف، قیود و متغیرهای تصمیم‌گیری

کار حاضر به بهینه‌سازی توابع هدف "حداکثر زمان‌های تولید توان" و "حداکثر سود حاصله" به صورت مجزا و همزمان می‌پردازد. 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 می‌گیرد. بنابراین حداکثرسازی تابع هدف نشان داده شده در رابطه (42) به منزله حداکثرسازی 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 می‌شود.

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

ارزش برق در طول شبانه‌روز نیز به صورت رابطه (44) در نظر گرفته می‌شود [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 تصمیم‌گیری 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 بهینه‌سازی

در مقاله حاضر از الگوریتم ژنتیک به عنوان الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده است. در این الگوریتم، جمعیتی از حل‌ها به صورت تصادفی ایجاد شده و نسل‌های بعدی بر پایه احتمال بقای بیشتر حل‌های بهتر تولید می‌گردد. اپراتورهای ژنتیک استفاده شده در این مقاله شامل انتخاب با استفاده از چرخ

رولت، ترکیب تک‌نقطه‌ای و جهش یکنواخت می‌باشند. معیار توقف الگوریتم، همگرایی 50 نسل متوالی به بهترین حل بدون تغییر بوده و احتمال ترکیب برابر 80% در نظر گرفته می‌شود.

بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب<sup>1</sup> صورت می‌گیرد. این الگوریتم با اضافه شدن دو عملگر ضروری به الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه معمولی، به یک الگوریتم چندهدفه تبدیل شده است که به جای یافتن بهترین جواب، دسته‌ای از بهترین جواب‌ها را ارائه می‌دهد که با نام جبهه پارتو<sup>2</sup> شناخته می‌شوند. این دو عملگر عبارت‌اند از:

1. عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد.

2. عملگری که تنوع جواب را در میان جواب‌های با رتبه برابر حفظ می‌کند.

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

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

#### 4- اعتبارسنجی مدل‌سازی

برنامه کامپیوتری الگوریتم‌های مدل‌سازی و بهینه‌سازی توسط نویسندگان مقاله ایجاد شده است. در این بخش، مدل‌سازی حاضر از طریق مقایسه با نتایج موجود در مرجع [14] صحت‌سنجی می‌گردد. مقدار تابش‌های عمودی مستقیم حالت طراحی و نرخ جرمی روغن ارسالی به بخش تولید توان که 594 کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد، به عنوان ورودی به سیستم معادلات مدل‌سازی اعمال می‌شود. سایر داده‌های مورد نیاز در جدول 1 آورده شده‌اند. نتایج حاصل از مدل‌سازی 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 می‌دهد. از دلایل تفاوت محسوس‌تر میان مدل‌سازی حاضر و مرجع [14] در مورد توان گرمایی بخش تولید بخار می‌توان به نادیده گرفتن مولفه‌های فرعی موجود در آن (از جمله بخش بازگرمایش) در مدل‌سازی حاضر اشاره کرد.

پارامتر ضریب خورشیدی<sup>3</sup> 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 می‌شود.

#### 5- بحث بر روی نتایج

##### 5-1- نتایج به‌ازای شرایط بدون وجود سیستم ذخیره‌سازی گرمایی

در شرایطی که نیروگاه بدون سیستم ذخیره‌سازی گرمایی در نظر گرفته شود، کل انرژی گرمایی حاصل از میدان خورشیدی به بخش تولید توان ارسال می‌شود. در این شرایط در زمان‌هایی که تابش خورشیدی موجود می‌باشد تولید توان صورت گرفته ولی در زمان‌های فقدان تابش (یا شرایطی که تابش کمتر از حداقل مجاز است) توانی تولید نمی‌شود.

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 (%)	$\eta_{SG}$	98
افت فشار کلی بخش مولد بخار در شرایط طراحی (bar)	$\Delta P_{SG}$	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 بی بعد تعیین کننده شکل منحنی پمپ	$e_{m_o}$	-0/4

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

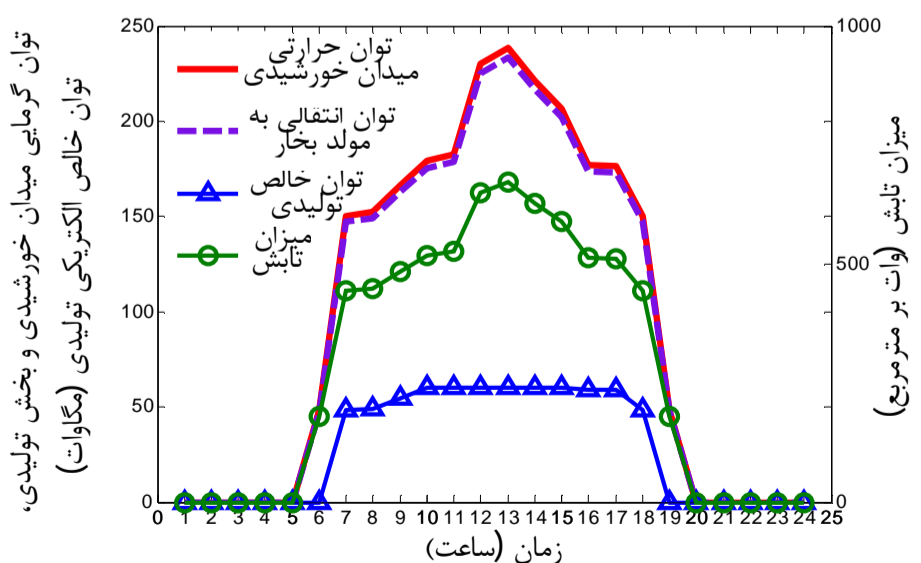
دست‌آورد مهمی در جهت پایداری بیشتر تولید برق باشد. این در حالی است که در شرایط بدون سیستم ذخیره‌ساز گرما (بخش 5-1) تولید توان تنها در 12 ساعت صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که توان‌های نسبتاً پایین (کارکرد در شرایط بار جزئی) در شکل 3 به این علت است که تولید بتواند در زمان‌های بیشتری صورت پذیرد.

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، به ترتیب 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 به صورت 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 گرمایی حاصل از میدان خورشیدی، توان حرارتی انتقالی به مولد بخار و توان خالص الکتریکی تولیدی، در شرایط نیروگاه بدون سیستم ذخیره‌سازی گرما

مقایسه‌ای میان توان گرمایی 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، به دلیل 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.

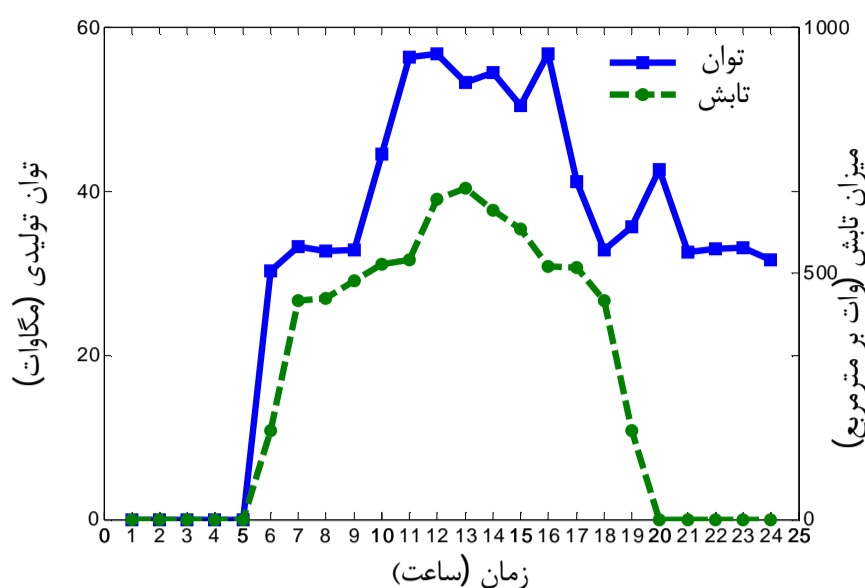
در شرایط عدم وجود سیستم ذخیره‌سازی گرمایی، سود روزانه حاصله و مجموع زمان‌های تولید به ترتیب 24772 دلار و 12 ساعت بوده است.

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

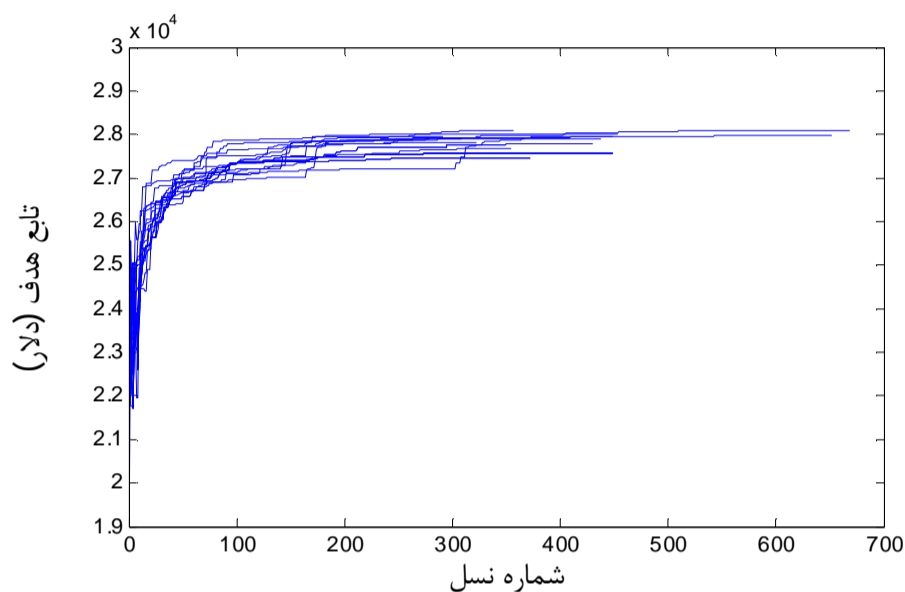
در این بخش، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با تابع هدف حداکثر مدت زمان تولید ارائه و بررسی می‌گردد. به منظور دستیابی به حل مناسب، مقادیر متفاوتی از جمعیت هر نسل (100، 150، 200)، و نرخ جهش (1%، 3% و 5%)، مورد آزمون قرار گرفت و در نهایت جمعیت 150 و نرخ جهش 3% به عنوان عملگرهای مناسب الگوریتم ژنتیک انتخاب شد.

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

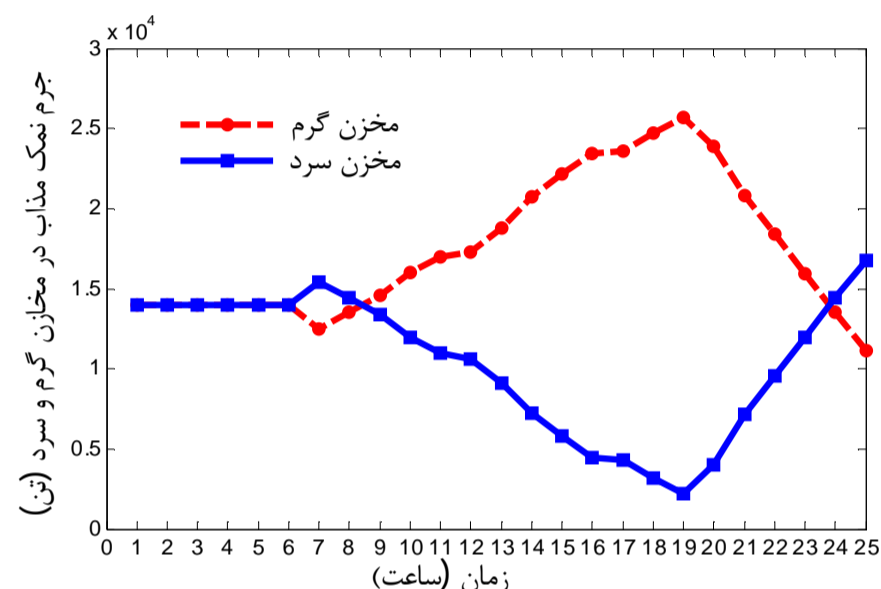
شکل 9 نمونه‌ای از جبهه‌های بهینه به‌دست آمده به ازای جمعیت 150 و احتمال جهش 3% را نشان می‌دهد. جبهه به‌دست آمده در آخرین نسل به‌عنوان جبهه بهینه نهایی در نظر گرفته شده و نزدیک‌ترین نقطه به نقطه ایده‌ال به عنوان نقطه بهینه نهایی معرفی می‌شود. نقطه ایده‌ال نقطه‌ای فرضی می‌باشد که مختصات آن در جهت محور 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



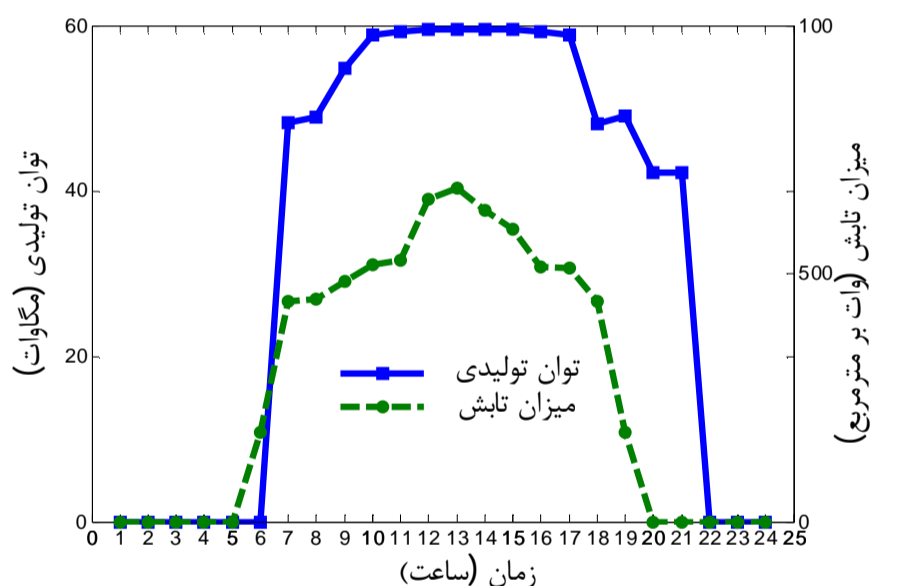
شکل 3 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی نیروگاه در کنار میزان تابش خورشیدی (تابع هدف حداکثر مدت زمان تولید)



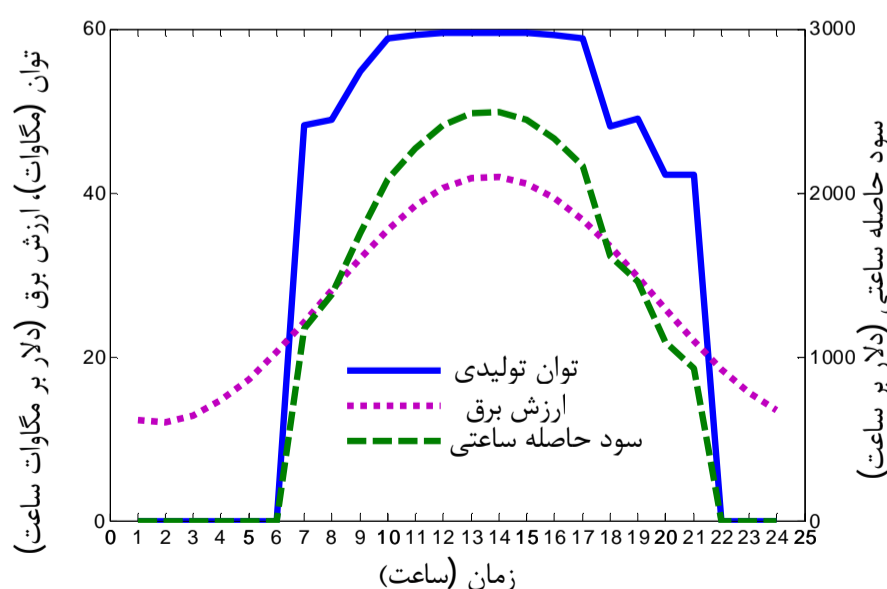
شکل 5 همگرایی الگوریتم ژنتیک به ازای اجراهای مختلف (تابع هدف حداکثر سود حاصله)



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



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)

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.

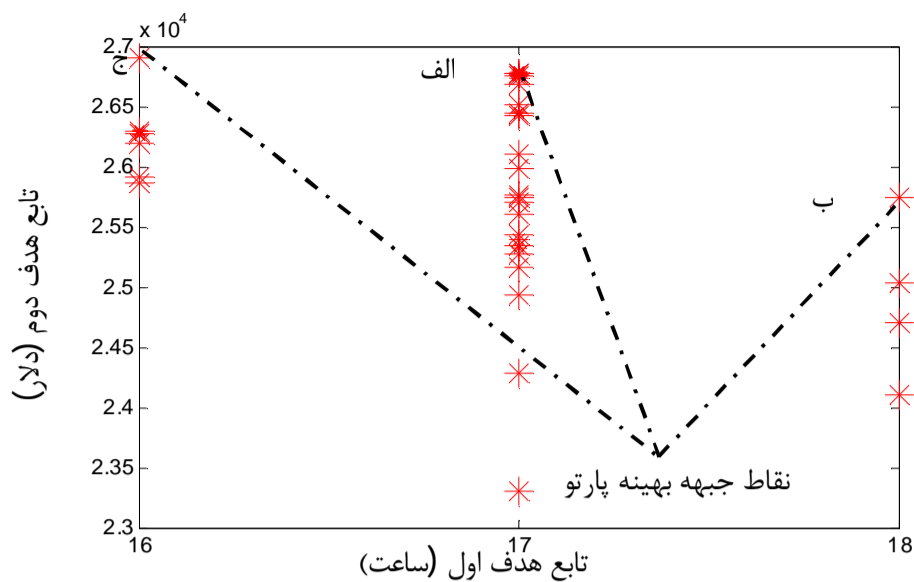
مطابق شکل 7، به منظور دستیابی به حداکثر سود، در زمان‌های با ارزش بالاتر الکتریسیته، تولید توان بیشتری صورت گرفته است. ضمناً از نیروگاه (از جمله مبدل‌ها و توربوماشین‌ها) در شرایط بار جزئی افت می‌نماید، فعالیت در توان بالاتر (کارکرد در بار کامل) مزیت بالاتر بودن کارایی حرارتی نیروگاه را نیز به همراه دارد.

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.

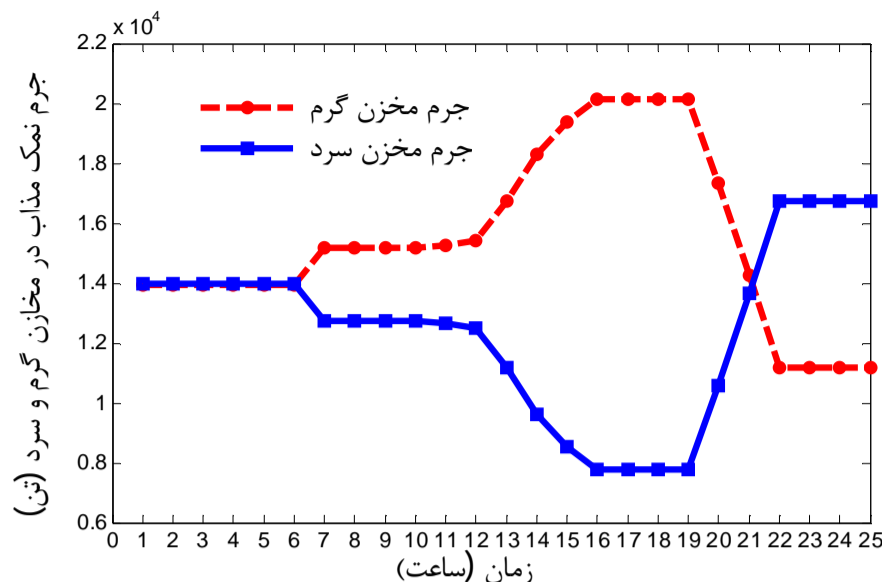
در این شرایط (یعنی با اعمال تابع هدف حداکثر سود حاصله) مقدار سود حاصله روزانه برابر با 28092/2 دلار و حدود 13/5 درصد از شرایط بدون سیستم ذخیره‌ساز گرما (بخش 5-1) بیشتر است.

#### 4-5- نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه

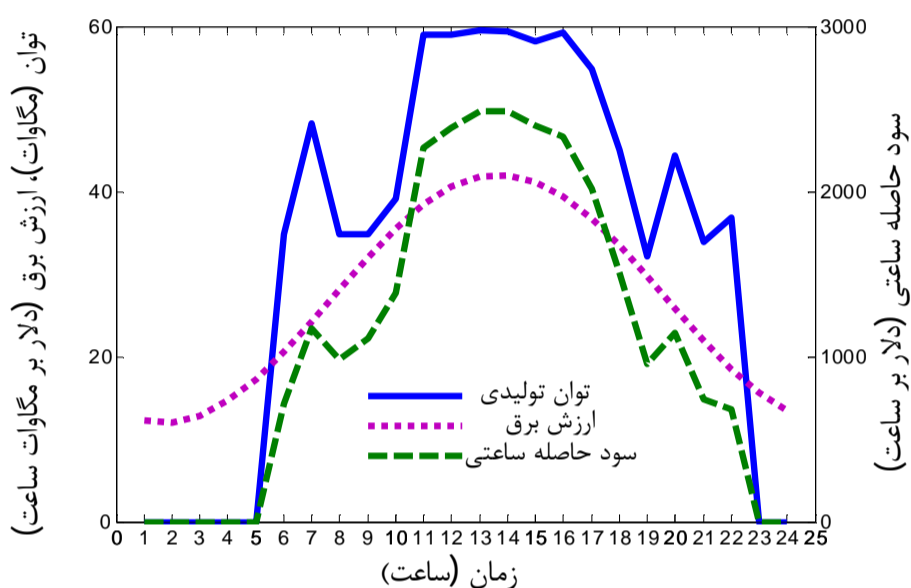
در این بخش، نتایج بهینه‌سازی هم‌زمان توابع هدف حداکثر مدت زمان تولید و حداکثر سود حاصله ارائه و تحلیل می‌گردد.



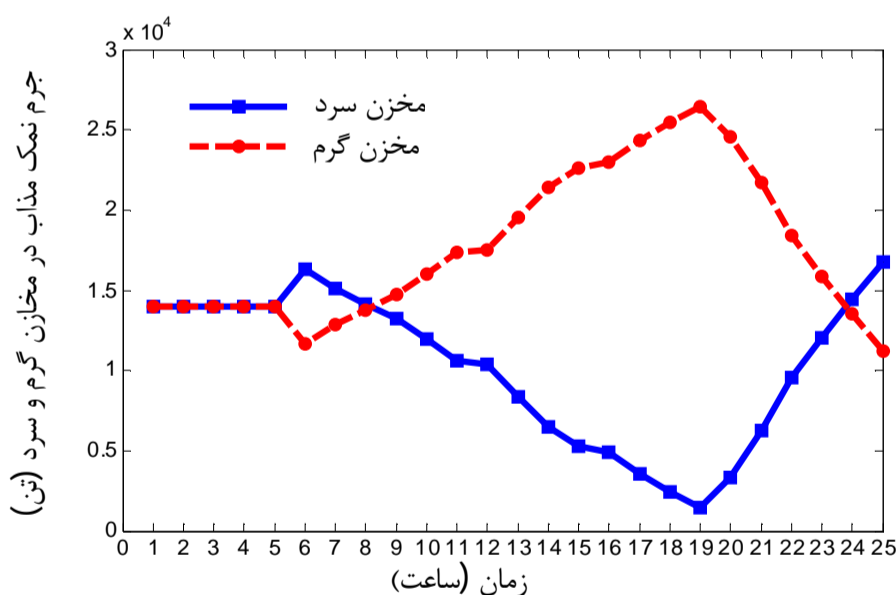
شکل 9 جبهه پارتو در بهینه‌سازی دوهدفه



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 (بهینه‌سازی دو هدفه)



شکل 11 تغییرات زمانی بهینه جرم نمک مذاب درون مخازن (بهینه‌سازی 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، هزینه‌های تراز شده حالت سوم (بهینه‌سازی با هدف حداکثر سود حاصله) کمترین مقدار را داراست. همچنین، مشاهده می‌شود که هزینه تراز شده انرژی در مقایسه هزینه تراز شده نیروگاه‌های سنتی (در حدود 70 الی 140 دلار برمگاوات ساعت) هنوز بالاست. البته،

یکدیگر ندارند و به اصطلاح غیر غالب‌اند و هر یک از این نقاط این پتانسیل را دارند تا به‌عنوان نقطه بهینه نهایی معرفی شوند. نقطه "الف" به دلیل اینکه نزدیک‌ترین نقطه به نقطه ایده‌آل می‌باشد، به‌عنوان نقطه بهینه نهایی انتخاب می‌شود.

شکل 10 تغییرات زمانی بهینه توان تولیدی نیروگاه را در کنار سود حاصله ساعتی و ارزش برق نشان می‌دهد. مطابق نمودارهای موجود در این شکل، همزمان با حداکثر سود، حداکثر پایداری تولید نیز مدنظر قرار گرفته و به‌جز 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 می‌دهد. 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 بخش‌های پیشین مورد مقایسه قرار می‌گیرند. این مقایسه در جدول 3 صورت پذیرفته است. مطابق این جدول، نیروگاه با سیستم ذخیره‌سازی با تابع هدف حداکثر زمان تولید نسبت به نیروگاه بدون ذخیره‌سازی، به‌میزان 7 ساعت، مدت زمان تولید بیشتری را دارا می‌باشد.

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

همان‌طور که بحث شد، توجه مقاله حاضر معطوف بر بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی عملکرد پرداخته شده است. اما به‌عنوان 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 می‌گردد 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 می‌شود.

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



		جدول 3 مقایسه نتایج حاصله		
		مدت زمان تولید (ساعت)	سود حاصله (دلار)	هزینه تراز شده انرژی (دلار بر مگاوات ساعت)
شرایط بدون سیستم ذخیره‌ساز گرما	12	24772/0	185/6	
بهینه‌سازی با اعمال تابع هدف اول (حداکثر زمان تولید)	19	25293/9	188/3	
بهینه‌سازی با اعمال تابع هدف دوم (حداکثر سود)	15	28092/2	183/9	
بهینه‌سازی با اعمال همزمان دو تابع هدف	17	26773/1	186/6	

		جدول 4 مقادیر پارامترهای اقتصادی [26]	
هزینه سرمایه گذاری نیروگاه با سیستم ذخیره سازی (دلار بر کیلووات)	8000	هزینه سرمایه گذاری نیروگاه بدون سیستم ذخیره سازی (دلار بر کیلووات)	6800
هزینه تعمیرات و نگهداری (دلار بر کیلووات ساعت)	0/04	نرخ سود بانکی	10%
عمر سیستم (سال)	30		

علائم یونانی	معنی
$\eta$	راندمان
<b>زیر نویس‌ها</b>	
BOP	بخش تولید توان
C	مخزن نمک مذاب سرد
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 ذخیره‌سازی گرمایی
th	گرمایی

هزینه تراز شده وابستگی زیادی به پارامترهای اقتصادی دارد و روند ذکر شده بدون پیچیدگی اضافی قابل پیاده‌سازی برای مقادیر دیگر پارامترهای اقتصادی می‌باشد.

## 6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در مقاله حاضر، مدلی حرارتی و یکپارچه برای مدل‌سازی شبه‌پایای عملکرد نیروگاه خورشیدی مجهز به سیستم ذخیره‌ساز گرما ارائه گردید. پس از اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از آن به عنوان زیر برنامه برای بهینه‌سازی عملکرد روزانه یک نیروگاه با اهداف "حداکثر زمان‌های 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 ذخیره‌ساز گرما، امکان تولید در زمان‌های بدون تابش و بنابراین افزایش مدت زمان عملکرد نیروگاه و پایداری تولید حاصل خواهد شد.

همچنین نتایج حاصل از بهینه‌سازی تک‌هدفه با هدف افزایش سود حاصله نشان می‌دهد که سیستم ذخیره‌سازی از طریق ذخیره انرژی در زمان‌های با ارزش پایین الکتریسیته و استفاده از آن در جهت تولید توان حداکثری در شرایط با ارزش بالای الکتریسیته منجر به افزایش سود حاصله می‌شود.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه نیز بیان‌گر آن است که با ایجاد توازن میان دو تابع هدف، امکان دستیابی به سود و پایداری مناسب به‌صورت همزمان، میسر خواهد شد.

## 7- فهرست علائم

$C_p$	گرمای ویژه ( $J/kg \cdot K^{-1}$ )
$DNI$	تابش گرمایی مستقیم خورشیدی ( $W/m^2$ )
$e_{mo}$	پارامتر بی‌بعد 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. Larrain, 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. Ghoheity, 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-García, 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. Haghghi Khoshkhou, 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. Haghghi Khoshkhou, 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.