



بهینه سازی ترمو اقتصادی اندازه مزرعه خورشیدی نیروگاه سیکل ترکیبی-تلفیقی یزد

وحید مهرنیا^۱، رامین حقیقی خوشخو^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران

* صندوق پستی ۱۷۱۹-۱۶۷۶۵، khoshkhoo@pwut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۴ خرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۵ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نیروگاه سیکل ترکیبی- تلفیقی خورشیدی

کلکتور سهموی خطی

قیمت تمام شده برق تولیدی

اندازه مزرعه خورشیدی

چکیده

مزرعه خورشیدی قسمتی از نیروگاه خورشیدی است که وظیفه مبادله حرارت از خورشید به یک سیال را بر عهده دارد. تناسب اندازه مزرعه خورشیدی با دیگر تجهیزات نیروگاه یکی از عوامل مهم در قیمت تمام شده برق تولیدی می باشد. در این مقاله اندازه بهینه اقتصادی مزرعه خورشیدی تلفیق شده با یک سیکل ترکیبی تعیین گردیده است. به علاوه الگوریتمی برای شبیه سازی عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی ارائه شده است. چهار مزرعه خورشیدی با اندازه های مختلف ولی مشخصات یکسان در بلوک قدرت در نظر گرفته شده اند. عملکرد حرارتی هر مزرعه در شرایط نامی و شرایط بار جزئی مطالعه شده است. مزرعه خورشیدی و سیکل ترکیبی با کد نویسی در نرم افزار ای ای اس شبیه سازی شده اند. با توجه به اطلاعات هواشناسی ساعتی، تولید انرژی الکتریکی برای یک سال محاسبه گشته است. هزینه تمام شده تولید برق برای هر واحد محاسبه گردیده و سرانجام مزرعه ای که کمترین هزینه تولید برق را نتیجه می دهد بعنوان مزرعه با اندازه بهینه انتخاب شده است. با توجه به آنالیز اقتصادی انجام شده، اندازه بهینه اقتصادی مزرعه در نیروگاه های خورشیدی ترکیبی- تلفیقی تابعی از موقعیت نیروگاه، توان درخواستی اچ آر اس جی، و قیود بلوک قدرت و مزرعه خورشیدی می باشد.

Solar field thermo-economical optimization of Yazd integrated solar combined cycle (ISCC)

Vahid Mehrnia, Ramin Haghighi Khoshkhoo*

Mechanical Engineering, Power & Water University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-1719 Tehran, Iran. khoshkhoo@pwut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 25 May 2013

Accepted 06 July 2013

Available Online 20 April 2014

Keywords:

Integrated Solar Combined Cycle

Parabolic Trough Collector

Levelized Cost of Energy

Solar Field Size

ABSTRACT

Solar field transfer heat of solar radiation to the heat transfer fluid. Appropriate size of solar field is one of the most important parameters in levelized cost of solar electricity. In this paper optimum solar field size in an integrated solar combined cycle is determined. Furthermore, an algorithm is presented for the simulation of parabolic trough solar collector performance. Four solar fields by different size but same power block are considered. Thermal performance of each field in terms of nominal and partial load conditions is studied. Solar field and combined cycle are simulated by coding in EES software. According to The hourly meteorological data, electricity generated for a year is calculated. Levelized cost of solar electricity for each field size is calculated and optimum size of the field is selected. According to the economic analysis, the optimum solar field size in an integrated solar combined cycle is depended to location of plant, HRSG power demand, and the constraints of the power block and solar field.

۱- مقدمه

تکنولوژی نیروگاه خورشیدی حرارتی سهموی خطی برای تولید قدرت در منطقه مدیترانه انجام داده است. پادیا و همکاران [۳] یک مدل انتقال حرارت جامع برای آنالیز حرارتی کلکتورهای سهموی خطی ارائه داده اند. هانگ و همکارانش [۴] یک مدل تحلیلی جدید برای محاسبه بازده اپتیکی متمرکزکننده خورشیدی سهموی خطی پیشنهاد داده اند. چنگ و همکارانش [۵] در مقاله خود یک شبیه سازی عددی سه بعدی روی مدل کلکتور خورشیدی سهموی خطی بوسیله اتصال روش حجم محدود (FVM) و روش اثر پرتو مونت کارلو (MCRT) انجام داده اند.

برخی مطالعات نتایج شبیه سازی نیروگاه سهموی خطی با نرم افزارهای مناسب را با داده های عملکردی نیروگاه مقایسه کرده اند. برای مثال مزرعه

انتظار جایگزینی نیروگاه های حرارتی خورشیدی با سوخت های فسیلی از سایر انرژی های تجدیدپذیر بیشتر است، و در بین فناوری های حرارتی خورشیدی، کلکتورهای سهموی خطی رشد تجاری بیشتری داشته اند [۱].

شبیه سازی های زیادی برای آنالیز تولید قدرت اقتصادی از نیروگاه های خورشیدی سهموی خطی انجام شده است. تحقیقات تجربی زیادی نیز بر مبنای آزمایش و بهینه سازی اجرا شده است. همچنین مدل های ترمودینامیکی و تحلیل انتقال حرارت نیروگاه های حرارتی خورشیدی و اجزای آن مانند کلکتور خورشیدی به طور گسترده ای انجام گرفته است.

آندرس پولیکاس [۲] یک مطالعه امکان سنجی اقتصادی در مورد نصب

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

که بخار مورد نیاز برای یک توربین بخار 160 MW را تأمین می‌کند. قسمتی از بخار توسط مزرعه خورشیدی و از طریق مبدل‌های حرارتی تأمین می‌شود. این بخار خورشیدی به اچ‌آراس‌جی‌ها اضافه شده و در تولید بخشی از توان الکتریکی خروجی که تقریباً 17 MW (از کل 160 MW در شرایط نامی) است، شرکت می‌کند.

هر حلقه مزرعه خورشیدی در این نیروگاه از ۴ کلکتور نوع ای‌تی ۱۵۰ تشکیل شده است که سیستم ردیابی خورشید در آنها تک محوره می‌باشد و راستای قرارگیری محور آنها شمالی-جنوبی است. بنابراین ردیابی خورشید از شرق به غرب می‌باشد. روغن ترمینال وی‌پی‌وان به عنوان سیال انتقال دهنده حرارت در مزرعه خورشیدی استفاده شده است. این روغن قابلیت تحمل دما تا 420°C درجه سانتی‌گراد را دارد و بعد از این دما به شدت تجزیه می‌شود. روغن پس از خروج از مزرعه خورشیدی با دمای 393°C درجه سانتی‌گراد وارد دو مبدل حرارتی شده و حرارت خود را به آب می‌دهد. این آب مایع متراکم است و از اکونومایزر پرفشار اچ‌آراس‌جی (مبدل حرارتی شماره ۴) در شکل ۱) دریافت می‌شود. بخار ایجاد شده در مبدل‌های حرارتی مزرعه خورشیدی وارد درام پرفشار اچ‌آراس‌جی می‌گردد. مبدل حرارتی بخار اشباع را با همان شرایط ترمودینامیکی درام پرفشار تولید می‌کند. بخار پرفشار تولیدی از هر دو قسمت مزرعه خورشیدی و اچ‌آراس‌جی در درام پرفشار ترکیب شده و در سوپرهیت‌های اچ‌آراس‌جی (مبدل حرارتی شماره ۷) در شکل ۱) سوپرهیت می‌شوند، و سرانجام جریان وارد توربین بخار می‌شود. جدول ۱ پارامترهای نقطه طراحی را برای نیروگاه ترکیبی- تلفیقی خورشیدی یزد به طور خلاصه نشان می‌دهد.

برای شبیه‌سازی مزرعه خورشیدی یک مدل با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار ای‌ای‌اس ایجاد شد. ورودی‌های مدل به دو بخش تقسیم می‌شوند: داده‌های ثابت و متغیر. داده‌های ثابت تشکیل شده‌اند از: نوع و مشخصات کلکتورهای سهموی خطی، فاصله ردیف‌ها، سیال انتقال دهنده حرارت و محدوده دمایی سیال انتقال دهنده حرارت. ورودی‌های ثابت برای این تحقیق در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱ پارامترهای نقطه طراحی برای مزرعه خورشیدی 17 MW سیکل ترکیبی- تلفیقی خورشیدی یزد

پارامترهای نقطه طراحی	مقادیر طراحی
شدت تابش مستقیم	800 W/m^2
زاویه تابش	49°
طول جغرافیایی	$20^\circ 56' 31'' \text{ N}$
عرض جغرافیایی	$30^\circ 20' 54'' \text{ E}$
جهت گیری محور آینه‌ها	شمال- جنوب
دمای محیط	19°C
ارتفاع از سطح دریا	1230 (m)

جدول ۲ ورودی‌های ثابت برای کد

پارامتر ورودی	مقادیر در نظر گرفته شده
نوع کلکتور	ای‌تی ۱۵۰
سیال انتقال دهنده حرارت	ترمینال وی‌پی‌وان
نوع HCE	اسکات پی‌تی آر ۷۰
پوشش جاذب	کروم سیاه لوز
تعداد کلکتورها در هر حلقه	۴
دمای سیال در ورودی مزرعه	293°C
دمای سیال در خروجی مزرعه	393°C

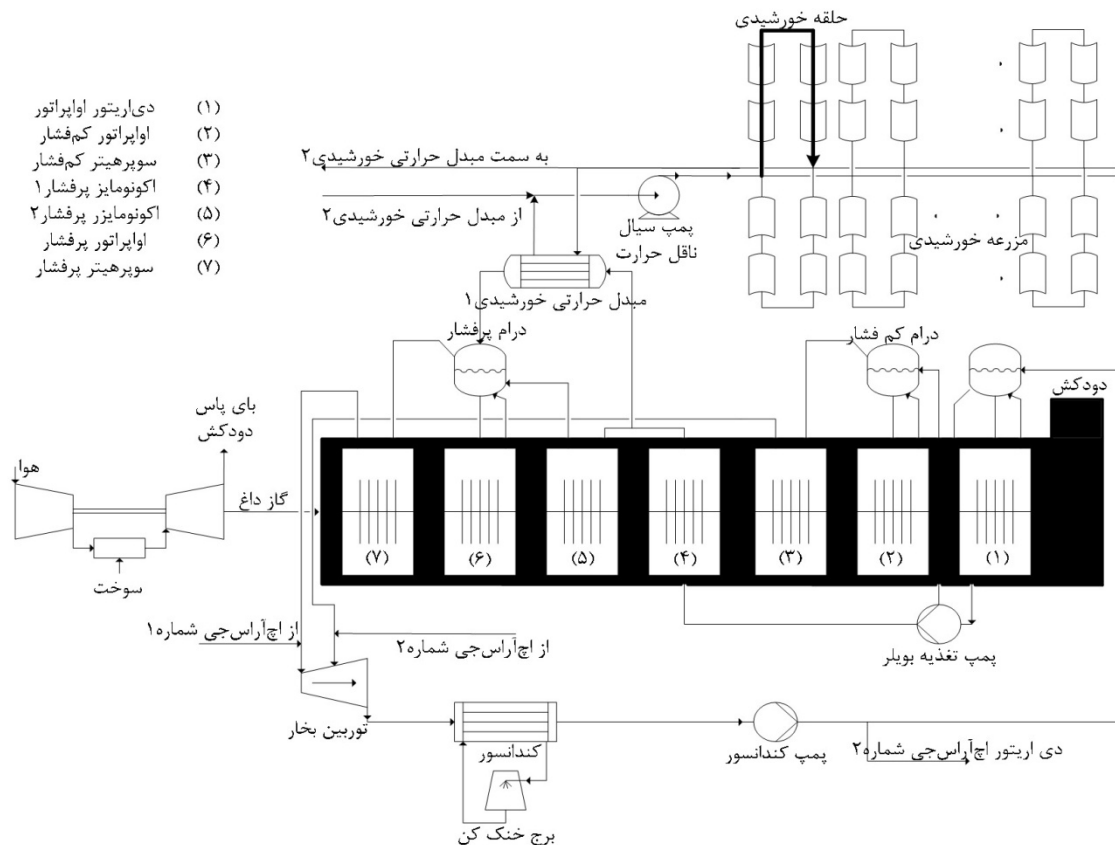
خورشیدی سهموی خطی با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری مانند ترنسیس [۶،۷]، ای‌ای‌اس [۸] و سم [۹،۱۰] مدل شده است.

هزینه بالای تولید برق از نیروگاه‌های خورشیدی سبب شده است تا این نیروگاه‌ها توانایی رقابت با نیروگاه‌های مرسوم سوخت فسیلی را نداشته باشند. از این رو برای کاهش قیمت برق تولید شده از نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی اقدامات و تحقیقات زیادی صورت گرفته است. شرکت عملیاتی KJC برنامه‌ای تحت عنوان، برنامه کاهش هزینه تعمیر و نگهداری انجام داده است [۱۱]. پیترپال و همکاران [۱۲] با ارزیابی یک سیستم سهموی خطی با تولید بخار مستقیم، پتانسیل کاهش قیمت در بخش‌های مختلف آن را نشان دادند.

اندازه نامناسب مزرعه خورشیدی هزینه تولید انرژی را افزایش می‌دهد. اگر مزرعه خورشیدی نسبت به تجهیزات بلوک قدرت خیلی بزرگ باشد در بیشتر ساعات بخصوص نزدیک ظهر حرارت مازاد بر نیاز بلوک قدرت تولید می‌شود. بنابراین بلوک قدرت نمی‌تواند همه حرارت قابل جذب توسط مزرعه خورشیدی را استفاده کند. اختلاف بین حرارت قابل جذب در مزرعه خورشیدی و ماکزیم ظرفیت قابل دریافت توسط بلوک قدرت، انرژی دورریز نامیده می‌شود. اگر مزرعه خورشیدی نسبت به بلوک قدرت کوچک باشد، تجهیزات تولید برق کمتر در نزدیکی بار نامی خود کار می‌کنند. بنابراین در طراحی نیروگاه خورشیدی حداکثر استفاده از تجهیزات تولید قدرت همزمان با به حداقل رساندن اندازه مزرعه خورشیدی امری مهم می‌باشد. بر همین اساس مونتس و همکاران [۱۳] بهینه‌سازی ضریب اندازه مزرعه خورشیدی را برای یک نیروگاه خورشیدی حرارتی مستقل و بدون سیستم ذخیره‌سازی انجام داده‌اند. تاکنون بهینه‌سازی اندازه مزرعه خورشیدی برای مزرعه خورشیدی تلفیق شده با واحد سیکل ترکیبی انجام نگرفته است. هنری پرایس و دیوید کرنی [۱۴] به مرور قیمت برق خورشیدی و امکان سنجی کاهش قیمت تولید برق در نیروگاه‌های سهموی خطی پرداختند. آنها در گزارش خود راه‌کارهایی را برای کاهش قیمت برق خورشیدی در کوتاه مدت، میان مدت و بلند ارائه داده‌اند، از جمله این پیشنهادها عبارتند از: افزایش مقیاس نیروگاه‌ها، تلفیق با واحدهای سیکل ترکیبی، افزودن ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، وضع قوانینی برای مشوق‌های مالی، و بهبود تکنولوژی دریافت‌کننده‌ها و متمرکزکننده‌ها. نیروگاه خورشیدی یزد یک مزرعه خورشیدی تلفیق شده با واحدهای سیکل ترکیبی می‌باشد. در این مقاله بهینه‌سازی اندازه یک مزرعه خورشیدی تلفیق شده با سیکل ترکیبی یزد انجام گرفته است. روش تا حد زیادی شبیه به روش مونتس [۱۳] می‌باشد، یعنی محاسبه تولید برق سالانه و محاسبه قیمت برق تمام شده با توجه به هزینه‌ها. ولی نیروگاه خورشیدی ترکیبی- تلفیقی با نیروگاه خورشیدی مستقل تفاوت‌هایی دارد که در این مطالعه به آنها توجه شده است. اول این که قیمت تجهیزات بلوک قدرت نباید به عنوان هزینه اولیه برای محاسبه قیمت تمام شده برق تولیدی در نظر گرفته شود. دومین تفاوت این است که چون بخار تولیدی در قسمت خورشیدی نسبت به بخار تولید شده در اچ‌آراس‌جی مقدار کمی می‌باشد، از این رو تغییرات تابش خورشید تأثیر زیادی بر راندمان بلوک قدرت نخواهد گذاشت. و مورد آخر این که به دلیل مسائل کنترلی، در قسمت درام اچ‌آراس‌جی، در مقدار بخار تولیدی در بخش خورشیدی محدودیت وجود دارد که مقادیر این محدودیت‌ها در قسمت‌های بعدی آورده شده است.

۲- شبیه‌سازی مزرعه خورشیدی

شماتیک سیکل ترمودینامیک ترکیبی- تلفیقی یزد در شکل ۱ نشان داده شده است. این نیروگاه دارای ظرفیت نامی 474 MW است، که از دو توربین گاز 157 MW تشکیل شده است. توربین‌های گاز به دو اچ‌آراس‌جی متصل شده‌اند



شکل ۱ پارامترهای شماتیک نیروگاه خورشیدی تلفیقی-ترکیبی یزد

شیشه‌ای) جذب می‌شود. روش‌های محاسبه افت‌های نوری در برخی بررسی‌ها مانند تحقیقات آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدید پذیر [۱۰]، مطالعات پانتود [۷] و گزارش آزمایش اتلاف حرارت در لوله‌های اسکات [۱۵] توضیح داده شده است. مشخصات نوری HCE و کلکتور بکار رفته در این مقاله در جدول ۴ نشان داده شده است. اجزای یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$\dot{E}_{ac} = \dot{q}_{21conv} \quad (3)$$

$$\dot{q}_{21conv} = \dot{q}_{32cond} \quad (4)$$

$$\dot{q}_{sol,a} = \dot{q}_{34conv} + \dot{q}_{34rad} + \dot{q}_{32cond} + \dot{q}_{cond,bracket} \quad (5)$$

$$\dot{q}_{34conv} + \dot{q}_{34rad} = \dot{q}_{45cond} \quad (6)$$

$$\dot{q}_{45cond} + \dot{q}_{sol,g} = \dot{q}_{56conv} + \dot{q}_{57rad} \quad (7)$$

رابطه انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت تابشی برای کلکتور با معادلات (۸) و (۹) تعریف می‌شود.

$$\dot{Q}_{rad} = h_r A_1 (T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (9)$$

A_1 و T_1 دما و مساحت سطح شماره ۱ و A_2 و T_2 دما و مساحت سطح شماره ۲ می‌باشد. این معادله هم برای انتقال حرارت تشعشعی از سطح خارجی لوله جاذب به سطح داخلی پوشش شیشه‌ای ($\dot{q}_{34rad}$) و هم برای انتقال حرارت تشعشعی از سطح خارجی پوشش شیشه‌ای به آسمان ($\dot{q}_{57rad}$) می‌باشد. برای انتقال حرارت تشعشعی از آبزور به شیشه و از شیشه به آسمان ضریب شکل برابر ۱ می‌باشد.

داده‌های متغیر عبارتند از: شدت تابش مستقیم عمودی خورشید، شدت و زاویه تابش، دما و فشار محیط، سرعت و جهت باد. این ورودی‌های متغیر از اطلاعات ساعتی ایستگاه هواشناسی نیروگاه در سال ۲۰۰۳ حاصل شده و برای شبیه‌سازی استفاده شده‌اند. خروجی‌های مدل شامل توان حرارتی یک حلقه خورشیدی و کل مزرعه، دبی جرمی سیال انتقال دهنده حرارت، اتلافات حرارتی (از جاذب‌ها و سیستم پایپینگ)، افت فشار در مزرعه خورشیدی و قدرت مصرفی پمپ می‌باشد.

هر حلقه از ۴ مجموعه کلکتور خورشیدی نوع ای تی ۱۵۰ ساخته شده است. ساختار حلقه‌ها قطعی شده‌اند، اما تعداد حلقه‌ها قابل تغییر است.

۲-۱- مدل سازی ترمودینامیکی کلکتورهای سهموی خطی

برای تخمین توان حرارتی کسب شده توسط مزرعه خورشیدی، سیال انتقال دهنده حرارت که در لوله دریافت‌کننده جریان دارد، در راستای طولی به بخش‌هایی مجزا تقسیم شده است. در هر مقطع، معادله بالانس انرژی می‌تواند مانند معادله (۱) نوشته شود؛ با ذکر این نکته که در اینجا رسانش در راستای طولی در مقایسه با انتقال حرارت جابجایی در این جهت قابل صرف نظر می‌باشد.

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{ac} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{m} \cdot h_{in} - \dot{m} \cdot h_{out} \quad (2)$$

که در اینجا $\dot{E}_{ac}$ توان حرارتی انباشته شده در هر بخش می‌باشد. توان حرارتی انباشته عبارتست از انتقال حرارت شعاعی در هر بخش که می‌تواند با استفاده از مدل مقاومت‌های حرارتی ارائه شده در شکل ۲ محاسبه شود. نقاط مختلف شکل ۲ در جدول ۳ توضیح داده شده است.

تابش مستقیم عمودی در نقطه ۳ (سطح جاذب) و نقطه ۵ (پوشش

مطابقت دارد. برای جریان سیال آشفته کاملاً توسعه یافته داخل لوله‌ها (یعنی $2300 < Re < 5 \times 10^6$ و $0.5 < Re < 2000$)، معادله ۱۴ برای Nu پیشنهاد شده است [۸].

مکانیزم انتقال حرارت جابجایی بین لوله‌های هم مرکز ($\dot{q}_{34conv}$) به فشار گاز موجود در فضای حلقوی بستگی دارد. در فشارهای پایین مکانیزم انتقال حرارت هدایت مولکولی است. در فشارهای بالاتر مکانیزم انتقال حرارت جابجایی آزاد خواهد بود. با توجه به فشار بسیار کم در فضای حلقوی بین لوله‌ها در این مقاله انتقال حرارت در این ناحیه بصورت رسانش می‌باشد. رسانش در لوله جاذب ($\dot{q}_{32cond}$) و پوشش شیشه‌ای ($\dot{q}_{45cond}$) با معادله (۱۵) محاسبه شده است.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1.07 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}\left(\frac{2}{Pr^3}-1\right)}} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^n \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{Cond} = \frac{2\pi Lk(\Delta T)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (15)$$

که در معادله (۱۵)، $\Delta T = T_2 - T_1$ اختلاف دمای سطح داخلی و خارجی لوله است.

اتصالات نگهدارنده که لوله جاذب را در کانون آینه‌ها نگه می‌دارند به صورت یک پره بلند عمل کرده و موجب اتلاف حرارت می‌شوند ($\dot{Q}_{Cond, bracket}$). دمای پایه این پره ۱۰ درجه کمتر از دمای سطح لوله جاذب (T_3) در نقطه اتصال با نگهدارنده با لوله جاذب در نظر گرفته شده است. افت حرارت در نگهدارنده با معادله (۱۶) [۸] تخمین زده می‌شود.

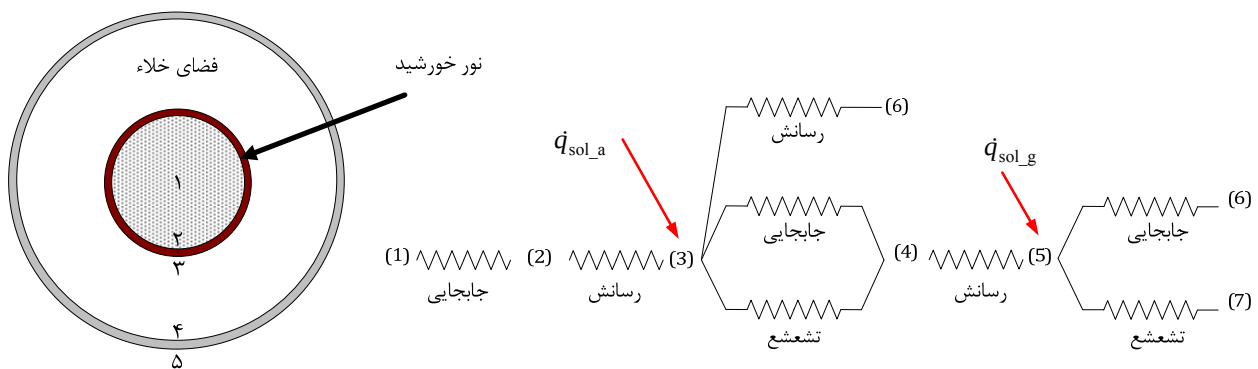
$$\dot{q}_{Cond, bracket} = \frac{\sqrt{h_b R_b K_b A_{cs,b}} (T_{base} - T_6)}{L_{HCE}} \quad (16)$$

معادله تشعشع خورشیدی جذب شده در لوله جاذب ($\dot{q}_{sol,a}$) به صورت معادله (۱۷) است.

$$\dot{q}_{sol,a} = W_{aperture} \cdot \Delta L_{aperture} \cdot DNI \cdot \cos(\theta) \cdot IAM \cdot RowShadow \cdot EndLoss \cdot \eta_{field} \cdot \eta_{HCE} \quad (17)$$

معادله تشعشع خورشیدی جذب شده در پوشش شیشه‌ای ($\dot{q}_{sol,g}$) نیز به صورت معادله (۱۸) است.

$$\dot{q}_{sol,g} = W_{aperture} \cdot \Delta L_{aperture} \cdot DNI \cdot \cos(\theta) \cdot IAM \cdot RowShadow \cdot EndLoss \cdot \eta_{field} \cdot \alpha_{env} \quad (18)$$



شکل ۲ مدل مقاومت‌های حرارتی برای مقطع عرضی لوله دریافت کننده

معادله کلی برای محاسبه انتقال حرارت جابجایی با معادله (۱۰) بیان می‌شود.

$$\dot{Q}_{conv} = hA(\Delta T) \quad (10)$$

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (11)$$

انتقال حرارت جابجایی از پوشش شیشه ای به اتمسفر ($\dot{q}_{56conv}$) بزرگ‌ترین منشا افت حرارتی است به ویژه زمانی که باد بوزد. جابجایی می‌تواند به هر دو شکل طبیعی و اجباری انجام شود که بستگی به وضعیت باد و سرعت وزش باد دارد.

اگر باد نوزد انتقال حرارت جابجایی از پوشش شیشه‌ای به محیط از طریق جابجایی طبیعی خواهد بود. در این حالت معادله (۱۲) برای پیش‌بینی عدد ناسلت استفاده می‌شود [۸].

$$Nu = (0.6 + \frac{0.387 Ra_{D5}^{\frac{1}{4}}}{[1 + (\frac{0.559}{Pr_{56}})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{1}{4}}})^2 \quad (12)$$

چنانچه باد بوزد انتقال حرارت جابجایی از پوشش شیشه‌ای به محیط از طریق جابجایی اجباری خواهد بود. عدد ناسلت در این حالت با رابطه جریان‌های جابجایی اجباری خارجی روی یک استوانه تک‌دما [۸] بیان می‌شود.

$$Nu = C Re_{D5}^m Pr_6^n \left(\frac{Pr_6}{Pr_{D5}}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

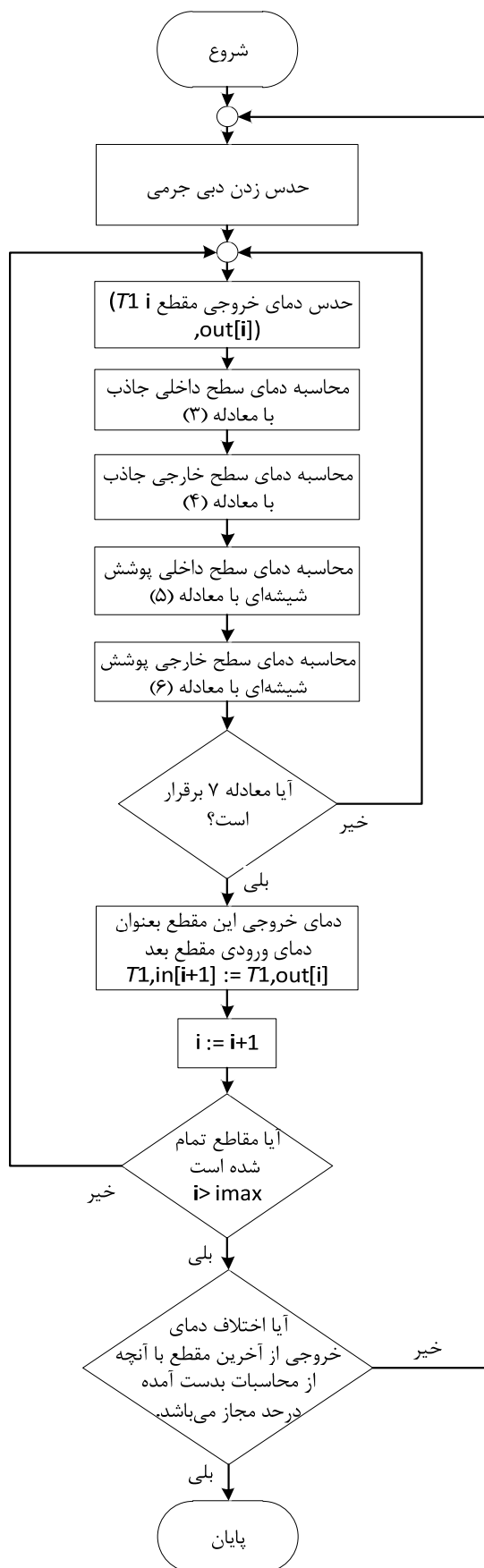
ثابت‌های C, M, n برای مقادیر مختلف Re_{D5} و Pr_6 موجود می‌باشند.

جدول ۳ توضیح قسمت‌های مختلف شکل ۲

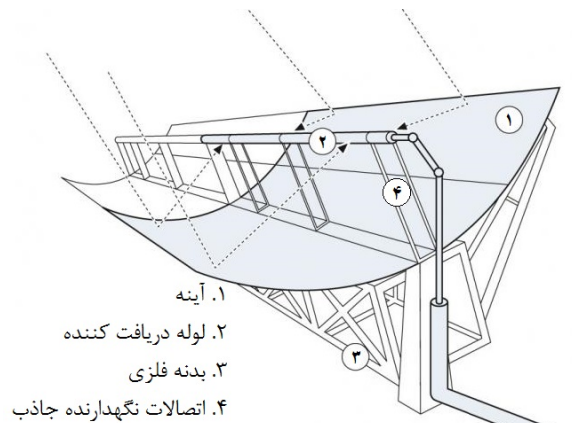
شماره	توضیح
(۱)	سیال ناقل حرارت
(۲)	سطح داخلی جاذب
(۳)	سطح بیرونی جاذب
(۴)	سطح داخلی پوشش شیشه‌ای
(۵)	سطح خارجی پوشش شیشه‌ای
(۶)	هوای اطراف
(۷)	آسمان

برای انتقال حرارت جابجایی بین سیال و سطح داخلی لوله جاذب ($\dot{q}_{21conv}$) نیز از معادله ۱۰ استفاده می‌شود. عدد ناسلت در جریان داخل لوله به نوع سیال گذرنده از لوله دریافت کننده بستگی دارد. در شرایط بهره‌برداری عادی جریان سیال داخل دریافت کننده به خوبی با ناحیه آشفته

حلقه در مدل مونتس و مدل ارائه شده مشاهده گردد.



شکل ۴ نمودار محاسبه بالانس حرارتی لوله دریافت کننده



شکل ۳ اجزای تشکیل دهنده کلکتور خورشیدی سهموی خطی

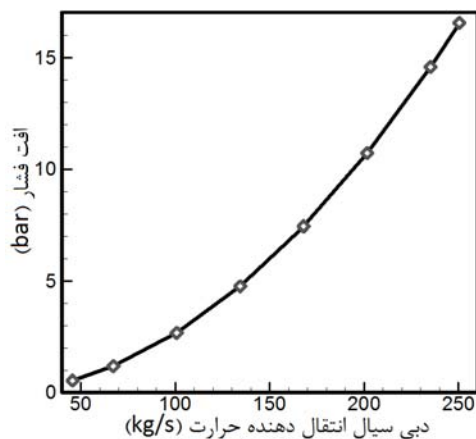
جدول ۴ اطلاعات نوری و هندسی برای HCE و کلکتور [۱۶،۱۷]

پارامترها	مقادیر
پارامترهای نوری برای HCE	
ضریب عبور پوشش شیشه‌ای	۰/۹۳۵
ضریب جذب پوشش روی جاذب	۰/۹۴
ضریب نشر پوشش روی جاذب	$5/323 \times 10^{-4} T(K)$
بیشترین راندمان نوری	۰/۷۵
پارامترهای نوری برای کلکتور	
ضریب بازتاب آیینه‌ها	۰/۹۲
فاکتور برخورد	۰/۹۲
پارامترهای هندسی برای کلکتور	
پهنای دهنه دید (m)	۵/۷۶
طول کانون (m)	۱/۷۱
طول هر المان (m)	۱۲
طول هر کلکتور (m)	۱۵۰
مساحت آیینه (m ²)	۸۱۷/۵
قطر لوله جاذب (m)	۰/۰۷
ضریب تمرکز هندسی	۸۲:۱

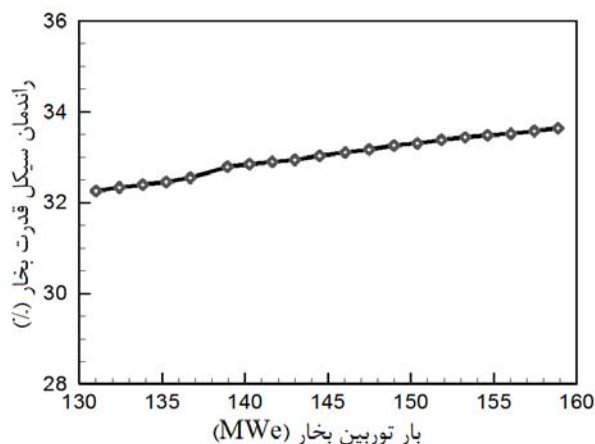
نمودار محاسبه دما در قسمت‌های مختلف لوله دریافت کننده در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نمودار، در ابتدا یک نرخ دبی جرمی برای سیال انتقال دهنده حرارت باید حدس زده شود، به علاوه واضح است که دمای ورودی به قطاع اول برابر دمای ورودی سیال به مزرعه خورشیدی است. دمای خروجی از هر قطاع می‌تواند با استفاده از معادلات بالانس انرژی محاسبه شود (معادلات ۱ تا ۷)، که به عنوان دمای ورودی به قطاع بعد در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، دمای خروجی از قطاع آخر پیدا خواهد شد، که این دما باید برابر دمای خروجی سیال از مزرعه خورشیدی باشد. پس از این، اگر دمای محاسبه شده و دمای خروجی از مزرعه برابر نباشند، باید دبی جرمی سیال انتقال دهنده حرارت تغییر داده شود و بر طبق آن بالانس انرژی دوباره انجام شود تا این که اختلاف دمای سیال خروجی از مزرعه با دمای محاسبه شده کمتر از دامنه تغییرات مجاز شود.

۳- اعتبارسنجی مدل

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، مونتس و همکارانش [۱۳] نیروگاه خورشیدی آلمریا در اسپانیا را مدل‌سازی کردند که اطلاعات ورودی مدل‌سازی آنها در جدول ۵ آورده شده است. از این ورودی‌ها در مدل ارائه شده در این مقاله بهره‌گرفته شد تا تفاوت بین حرارت بدست آمده از هر



شکل ۵ منحنی افت فشار سیال در مزرعه خورشیدی



شکل ۶ تغییر راندمان سیکل قدرت بخار در مقابل بار ژنراتور [۱۸]

با استفاده از همین معادله افت فشار در مزرعه خورشیدی محاسبه شده است. شکل ۵ منحنی افت فشار مزرعه خورشیدی را نشان می‌دهد. طبق شکل ۵ پمپ دور متغیر مدل CPKN 250-710 HPK شرکت KSB برای مزرعه انتخاب شده است. منحنی توان مصرفی پمپ برای جریان سیال با دبی‌های مختلف توسط کارخانه داده شده است.

۴-۳- راندمان توربین بخار

سهام بخار مزرعه خورشیدی در تولید قدرت کمتر از اچ‌آراس‌جی است و به‌علاوه ممکن است دبی جرمی بخار با تغییر دبی جرمی بخار مزرعه خورشیدی تغییری نکند.

منحنی عملکرد واحد بخار یزد (شکل ۶) نشان می‌دهد که راندمان توربین بخار نسبت به بار توربین بخار به آرامی تغییر می‌کند. در اینجا فرض شده است که راندمان بلوک قدرت ۳۳٪ باشد که راندمان میانگین منحنی نشان داده شده می‌باشد.

۵- قیود نیروگاه

محدودیت اول به شدت تابش مستقیم عمودی خورشید مربوط می‌شود، که اگر کمتر از ۲۰۰ MW_e باشد، قسمت خورشیدی نیروگاه کار نخواهد کرد. دومین قید به خود اچ‌آراس‌جی مربوط می‌شود، اگر بار اچ‌آراس‌جی کمتر از ۶۰٪ بار نامی‌اش باشد بخار بخش خورشیدی نمی‌تواند به اچ‌آراس‌جی وارد شود [۱۷].

اگر سرعت باد بیش از ۴۰ m/s باشد برای جلوگیری از وارد آمدن آسیب

جدول ۵ پارامترهای نقطه طراحی برای نیروگاه حرارتی خورشیدی ۵۰ MW_e (آمریا، اسپانیا) و مقایسه نتایج [۱۳]

پارامترهای ورودی طراحی	
شدت تابش مستقیم عمودی خورشیدی (W/m ²)	۸۵۰
ارتفاع از سطح دریا (m)	۳۶۶
دمای محیط (°C)	۲۵
زاویه تابش (محور شمالی - جنوبی)	۱۳°۳۹' ۱۴/۴"
نتایج	
مدل مونتنس [5]	مدل ارائه شده در این مقاله
توان حرارتی حلقه (MW)	۱/۸۸
	۱/۸۶

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، اختلاف بین توان حرارتی جذب شده از هر حلقه خورشیدی در مدل ارائه شده و مدل مونتنس کمتر از یک درصد است.

درصد خطای مدل مونتنس با مدل ارائه شده در این مقاله ۱/۰۶٪ می‌باشد. همچنین نتایج مدل ارائه شده در این مقاله با نتایج شرکت آریس [۱۸] در مورد نیروگاه خورشیدی یزد در نقطه طراحی و حالت‌های بار جزئی کاملاً مطابقت دارد.

برای برآورد انرژی اکتسابی سالانه، باید مشخصات ترمودینامیکی تجهیزات نیروگاه را در حالت بار جزئی دانست. از این رو، تغییر در مصرف برق پمپ، راندمان بلوک قدرت، راندمان مبدل‌های حرارتی خورشیدی در بار جزئی، و قیود نیروگاه در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴-۲- عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی- تلفیقی خورشیدی در حالت بار جزئی

۴-۱- عملکرد مبدل‌های حرارتی خورشیدی در شرایط بار جزئی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است دو مبدل حرارتی در سیکل مزرعه خورشیدی وجود دارد. کاهش نرخ جریان سیال انتقال دهنده حرارت راندمان مبدل حرارتی را کاهش خواهد داد. راندمان مبدل حرارتی با معادله (۱۹) بیان می‌شود [۷].

$$\eta_{SHX} = \frac{\dot{Q}_{water}}{\dot{Q}_{oil}} = \frac{\dot{Q}_{oil} - \dot{Q}_{loss}}{\dot{Q}_{oil}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{loss}}{\dot{Q}_{oil}} \quad (19)$$

با معلوم بودن $\dot{Q}_{loss}$ در شرایط نامی و فرض ثابت بودن $\dot{Q}_{loss}$ در بارهای جزئی و همچنین مشخص بودن $\dot{Q}_{oil}$ در تمام شرایط عملکرد نیروگاه می‌توان راندمان و در نتیجه انرژی منتقل شده به قسمت بخار ($\dot{Q}_{water}$) را محاسبه کرد.

۴-۲- توان مصرفی پمپ

دبی جرمی سیال ناقل حرارت در مزرعه خورشیدی با تغییر سرعت پمپ و کنترل شیرهای خروج سیال کنترل می‌شود. افت فشار در لوله‌های افقی با جریان آشفته کاملاً توسعه یافته به همراه افت فشار در اتصالات توسط معادله (۲۰) محاسبه می‌شود.

$$\Delta P = \frac{f \Delta L_{aperture} \rho v^2}{2D} + K_p \frac{\rho v^2}{2} \quad (20)$$

که f ضریب اصطکاک دارسی است، و برای جریان آشفته داخل لوله می‌تواند با معادله ۲۱ تخمین زده شود [۸].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}_D \sqrt{f}} \right) \quad (21)$$

جدول ۶ قیود مزرعه خورشیدی

مقدار قید	نام قید
۲۰۰	$DNI_{min} (W/m^2)$
۰/۷	$\dot{m}_{min,HCE} (kg/s)$
۳/۵۲	$\dot{m}_{st,min} (kg/s)$
۱۶/۱	$\dot{m}_{st,max} (kg/s)$
۵۸/۲	$\dot{Q}_{max,SHE} (MW_{th})$
۴۰	$V_{max,wind} (m/s)$

جدول ۷ هزینه تجهیزات و تعمیر و نگهداری مزرعه خورشیدی [۱۳]

مقدار هزینه	نوع هزینه
هزینه سرمایه‌گذاری	
۲۰۶	هزینه سرمایه‌گذاری مزرعه خورشیدی (€/m ²)
۱/۵۴	هزینه سرمایه‌گذاری پیش‌گرمکن (€/kW _e)
۱۰/۴۵	هزینه سرمایه‌گذاری تبخیرکننده (€/kW _e)
۲	هزینه زمین (€/m ²)
۲۰	هزینه ساخت، مهندسی و پیش‌آمدهای احتمالی (%)
هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری	
۴۸۰۰	هزینه کارگر در هر سال (€/year)
۱۰	تعداد افراد برای نگهداری و تعمیرات مزرعه
۱	هزینه تجهیزات سالیانه به صورت درصدی از هزینه سرمایه‌گذاری (%)
هزینه پارامترهای مالی	
۱	هزینه بیمه در هر سال (%/year)
۳۰	عمر پروژه (سال)
۸	نرخ بهره (%)

جدول ۸ اطلاعات شدت تابش مستقیم عمودی ماهواره‌ای [۱۷]

سال	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	میانگین
انرژی (kWh/m ²)	۲۰۰۱	۱۸۳۰	۱۸۴۶	۱۶۹۸	۱۸۷۹	۱۸۵۱

تعداد کلکتورها در هر حلقه ($N_{collector}$) در این مقاله ۴ و تعداد حلقه‌ها در مزرعه (N_{loop}) متغیر بوده و هدف این مطالعه یافتن تعداد حلقه‌ها برای رسیدن به حداقل قیمت تولید برق از نیروگاه خورشیدی است.

$$M_t = N_{labour} \times M_{labour} + M_{equip} + M_{insur} \quad (30)$$

$$M_{equip} = 0.01 \times I_{field} \quad (31)$$

$$M_{insur} = 0.01 \times I_t \quad (32)$$

برای یکی کردن ارزش سرمایه‌گذاری‌ها در سال‌های مختلف و جمع آن‌ها در یک سال از هزینه فعلی خالص استفاده می‌کنیم. هزینه فعلی خالص کل یک پروژه مجموع همه هزینه‌ها می‌باشد که عبارتست از: ارزش سرمایه‌گذاری، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه تعویض قطعات، هزینه‌های انرژی (هزینه سوخت به‌همراه هزینه‌های وابسته)، و هزینه‌های دیگر مانند دستمزدها و غیره.

$$NPC = \sum_{t=1}^n S_t \times \left(1 + \frac{r}{100}\right)^{-t} \quad (33)$$

که در معادله ۳۳، NPC هزینه فعلی خالص S در زمان سال n می‌باشد، مقدار هزینه اولیه و تعمیر و نگهداری در سال n است، و r نرخ بهره (%) می‌باشد.

اطلاعات شدت تابش مستقیم عمودی برای پنج سال (۲۰۰۱-۲۰۰۵) موجود است [۱۷]. طبق جدول ۸، داده‌های سال ۲۰۰۳ به میانگین ۵ ساله نزدیک‌تر است. بنابراین، انرژی سالانه تولیدی توسط مزرعه خورشیدی بر مبنای سال داده‌های سال ۲۰۰۳ محاسبه شده است.

به مزرعه، کلکتورها در حالت خوابیده قرار می‌گیرند. از جمله محدودیت‌های که در تجهیزات بکار گرفته شده در مزرعه وجود دارد حداکثر توان حرارتی قابل انتقال توسط مبدل‌های حرارتی خورشیدی است که توان هر مبدل $58/2 \text{ MW}_{th}$ می‌باشد. علاوه بر این کارخانه سازنده لوله‌های دریافت کننده برای دبی روغن در لوله‌ها میزان حداقل $0/7 \text{ kg/s}$ را تعیین کرده است. قید دیگر، محدوده دبی جرمی بخار بخش خورشیدی ($\dot{m}_{st}$) است، که عبارتست از بخاری که توسط مبدل‌های حرارتی خورشیدی تولید شده و به سمت درام پرفشار اچ‌آراس‌جی می‌رود. بر مبنای اطلاعات عملکرد اچ‌آراس‌جی، دبی جرمی بخار بخش خورشیدی باید بین $3/52 \text{ kg/s}$ و $16/1 \text{ kg/s}$ باشد [۱۷]. پس از رسیدن بخار بخش خورشیدی به بیشترین مقدار مجاز خود که به شدت تابش مستقیم عمودی بستگی دارد، اگر شدت تابش بیشتر افزایش یابد کلکتورهای چهارم و سوم هر حلقه باید به طور جزئی از حالت تمرکز خارج شوند تا دمای خروجی ثابت باقی بماند.

۶- اندازه اقتصادی مزرعه خورشیدی

با بزرگ‌تر شدن اندازه مزرعه خورشیدی تولید برق و هزینه سرمایه‌گذاری هر دو افزایش می‌یابد، اما هزینه تولید برق نه تنها به هزینه سرمایه‌گذاری و انرژی تولیدی سالانه بستگی دارد بلکه به نرخ بهره، هزینه تعمیر و نگهداری و عمر پروژه نیز وابسته است. اندازه اقتصادی مزرعه خورشیدی یعنی مزرعه خورشیدی با حداقل قیمت تولید برق که توان حرارتی تضمین شده را نیز تامین کند.

قیمت تمام شده برق تولیدی یک پارامتر عالی برای یافتن اندازه بهینه مزرعه می‌باشد که با معادله ۲۲ [۱۹] داده شده است.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (22)$$

هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری در جدول ۷ فهرست شده است. هزینه‌های بیمه و تعمیر و نگهداری درصدی از کل هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشند. هزینه ساخت درصدی از هزینه تجهیزات است. دوره بین سرمایه‌گذاری و ساخت مزرعه خورشیدی طبق برنامه یک سال در نظر گرفته شده است. تعداد ۱۰ نفر برای قسمت مزرعه خورشیدی استخدام خواهند شد. بیشترین توان الکتریکی مزرعه خورشیدی $18/8 \text{ MWe}$ است. برای برآورد قیمت تمام شده برق تولیدی، هزینه سیکل ترکیبی در نظر گرفته نشده زیرا بخش مزرعه خورشیدی به یک سیکل ترکیبی اضافه خواهد شد و قیمت برق تولیدی از هر کدام به صورت جداگانه محاسبه می‌شود.

برای محاسبه کل هزینه اولیه (I_t) و هزینه تعمیر و نگهداری سالانه (M_t) با استفاده از داده‌های جدول بالا، از معادلات (۲۳) تا (۳۲) استفاده شده است.

$$I_t = I_{field} + I_{land} + I_{preheater} + I_{evaporator} + I_{cons\&eng} \quad (23)$$

$$I_{field} = 206 \times A_{field} \quad (24)$$

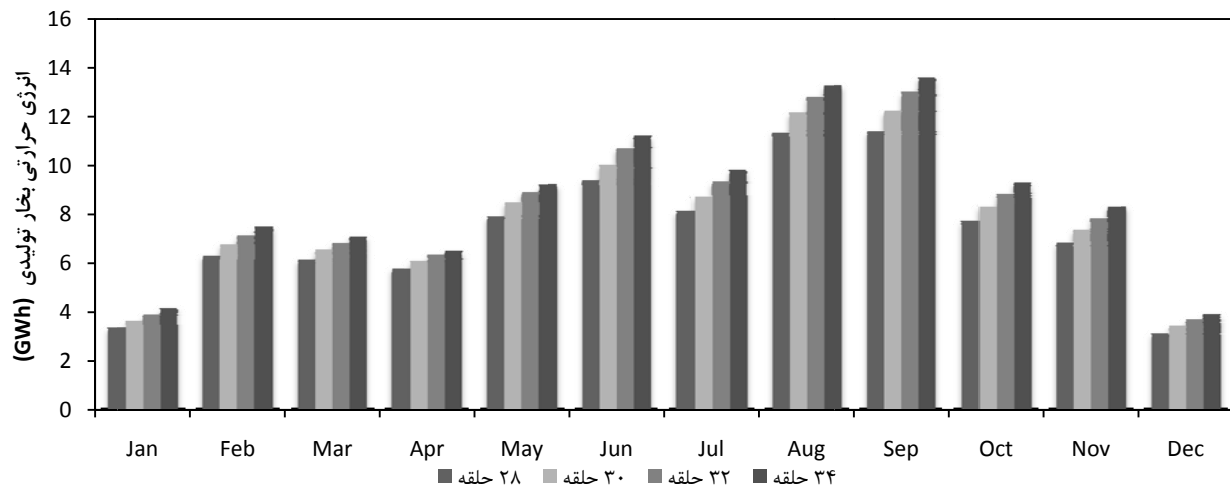
$$I_{land} = 2 \times A_{field} \quad (25)$$

$$I_{preheater} = 1.54 \times P_e \quad (26)$$

$$I_{evaporator} = 10.45 \times P_e \quad (27)$$

$$I_{cons\&eng} = 0.2 \times I_{field} \quad (28)$$

$$A_{field} = A_{collector} \times N_{collector} \times N_{loop} \quad (29)$$



شکل ۷ توزیع ماهانه بخار تولیدشده برای تعداد حلقه‌های مختلف

۷- نتایج

بر اساس توضیحات مزبور توان تولیدی و دورریز در مبدل‌های حرارتی خورشیدی برای هر ساعت در سال ۲۰۰۳ محاسبه شده است. مجموع توان محاسبه شده به صورت ساعتی انرژی را بر حسب Wh نتیجه خواهد داد. انرژی اکتسابی در چهار مورد مختلف محاسبه شده است. تعداد حلقه‌ها در هر مورد به دلیل تقارن مزرعه زوج در نظر گرفته شده است. شکل ۷ انرژی تولید شده توسط سیستم تولید بخار خورشیدی را برای موارد مختلف در هر ماه نشان می‌دهد.

انرژی دورریز انرژی است که می‌تواند توسط مزرعه خورشیدی جذب شود اما به علت محدودیت‌های بلوک قدرت نمی‌توان از آن استفاده کرد. بلوک قدرت دارای حد بالا و پایین می‌باشد که در قسمت محدودیت‌های بلوک قدرت به آن اشاره شد. بر این اساس، اگر توان حرارتی مزرعه خورشیدی که از محاسبات بدست آمده کمتر از حد پایین بلوک قدرت بود، کل توان محاسبه شده باید به عنوان انرژی دورریز در نظر گرفته شود.

گذشته از این، اگر توان حرارتی محاسبه شده برای مزرعه بیش از حداکثر قابل قبول توسط بلوک قدرت باشد، اختلاف بین توان محاسبه شده و حد بالای بلوک قدرت، مقدار انرژی دورریز خواهد بود. در نتیجه، انرژی دورریز ماهانه برای تعداد حلقه‌های مختلف در شکل ۸ نمایش داده شده است. این شکل می‌تواند یک درک ترمودینامیکی را از تعداد حلقه‌های موثر ارائه دهد. از آنجا که در ماه‌های زمستان شدت تابش مستقیم عمودی بر روی کلکتورها کم است، انرژی دورریز در مزرعه خورشیدی کوچک‌تر افزایش می‌یابد. اگرچه در ماه‌های تابستان که خورشید مرتفع‌تر است، در بیشتر مواقع کلکتورهای مزرعه خورشیدی بزرگ باید از حالت تمرکز خارج شوند تا از محدوده بالای بلوک قدرت عبور نکنند، این خارج شدن از حالت تمرکز موجب انرژی دورریز می‌شود.

با توجه به انرژی جذب شده (شکل ۷) و توضیحات راندمان بخش بخار، انرژی الکتریکی تولیدی توسط بخش خورشیدی به صورت سالانه و ماهانه تخمین زده شده است. نتایج انرژی الکتریکی اکتسابی سالانه بخش خورشیدی و قیمت تمام شده برق تولیدی در جدول ۹ داده شده است.

با بزرگ‌تر شدن مزرعه خورشیدی هزینه تعمیر و نگهداری بر واحد برق تولیدی کاهش می‌یابد. این به این دلیل است که یک بخش اصلی هزینه تعمیر و نگهداری، هزینه کارگر است و با توسعه ناچیز مزرعه، تعداد کارگرها ثابت می‌باشد.

جدول ۹ انرژی خروجی از مزرعه و قیمت تمام شده برق تولیدی

تعداد حلقه‌ها	سطح دهانه دپده کلکتور	برق تولیدی خالص سالانه	هزینه اولیه	قیمت تمام شده برق تولیدی
m^2	MWh_e	€	$\text{€}/kWh_e$	
۲۸	۹۱۵۶۰	۲۵۸۸۱	۲۳۰۴۲۱۶۴	۹/۸۳
۳۰	۹۸۱۰۰	۲۷۹۱۵	۲۴۶۷۱۹۳۲	۹/۷۳
۳۲	۱۰۴۶۴۰	۲۹۸۱۵	۲۶۳۰۱۷۰۰	۹/۶۸
۳۴	۱۱۱۱۸۰	۳۱۴۴۶	۲۷۹۳۱۴۶۸	۹/۷۳

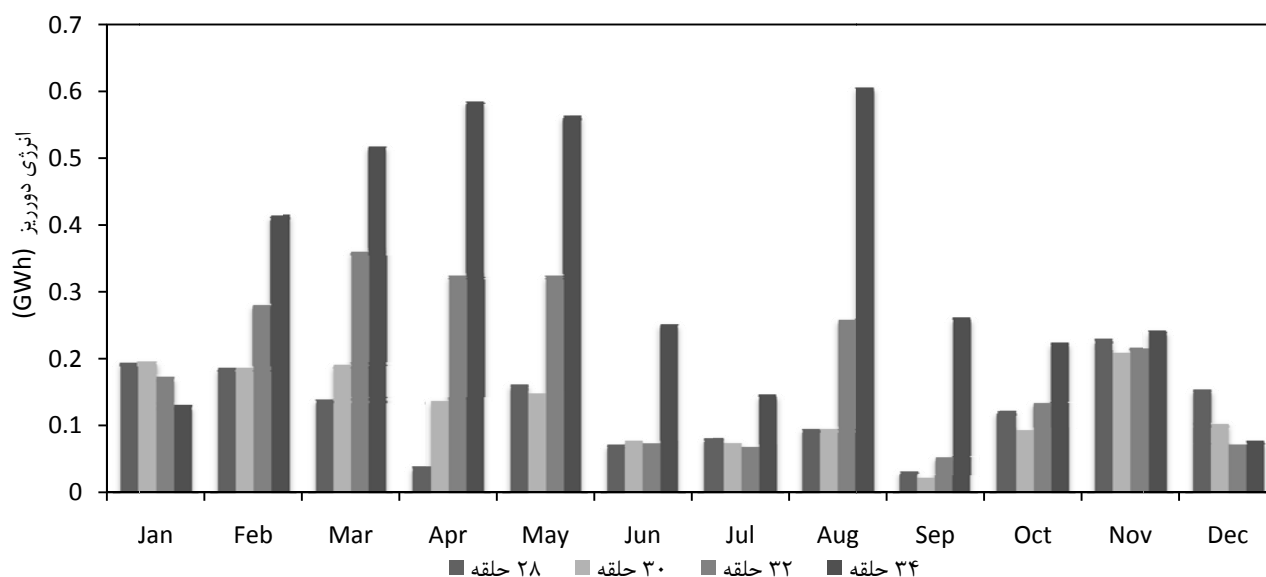
هر دو نمودار هزینه فعلی خالص و برق تولیدی در زمان عمر پروژه، در شکل ۹ نشان داده شده است. از آنجا که در این مقاله تجهیزاتی مانند مبدل حرارتی ثابت در نظر گرفته شده‌اند، برای کاهش قیمت تمام شده برق تولیدی، ضروری است تا قدرت خروجی از مزرعه را با افزایش اندازه مزرعه افزایش داد که این کار هزینه سرمایه‌گذاری را نیز افزون خواهد کرد.

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود شیب منحنی توان خالص خروجی کاهش می‌یابد. کاهش شیب منحنی تولید برق بدین معنی است که انرژی جمع‌آوری شده بیش از مقداری است که می‌تواند توسط اچ‌آراس‌جی دریافت شود، و بنابراین قسمتی از انرژی جمع‌آوری شده توسط مزرعه خورشیدی دورریز می‌گردد.

شکل ۹ فقط تغییرات هزینه فعلی خالص و برق تولیدی را به ازای اندازه‌های مختلف مزرعه خورشیدی به ما می‌دهد. برای یافتن اندازه بهینه مزرعه خورشیدی، پارامترهای دیگر آنالیز اقتصادی نیاز است. این رو قیمت تمام شده برق تولیدی محاسبه شده است. شکل ۱۰ قیمت تمام شده برق تولیدی را برای اندازه‌های مختلف مزرعه مورد مطالعه نشان می‌دهد. با بزرگ‌تر شدن مزرعه تولید سالانه نیز افزایش می‌یابد اما شیب منحنی تولید کاهش می‌یابد. همان‌طور که دیده می‌شود اندازه ۳۲ حلقه کمترین قیمت تمام شده برق را برای نیروگاه یزد و محدودیت‌های بلوک قدرت آن نتیجه می‌دهد.

هر دو مزرعه با ۳۰ و ۳۴ حلقه تقریباً یک قیمت تمام شده برق دارند، این موضوع به این دلیل است که در مورد مزرعه با ۳۰ حلقه، قسمتی از ظرفیت مبدل حرارتی استفاده نشده است. اگرچه، ظرفیت مزرعه نصب شده با ۳۴ حلقه بیشتر از آنچه مبدل حرارتی در بار کامل نیاز دارد می‌باشد.

مزرعه خورشیدی با اندازه ۳۲ حلقه نه تنها قادر است توان مورد نیاز اچ‌آراس‌جی را تولید کند، بلکه انرژی دورریز نسبتاً کمی را نیز نتیجه می‌دهد.



شکل ۸ انرژی دورریز ماهانه برای تعداد حلقه‌های مختلف

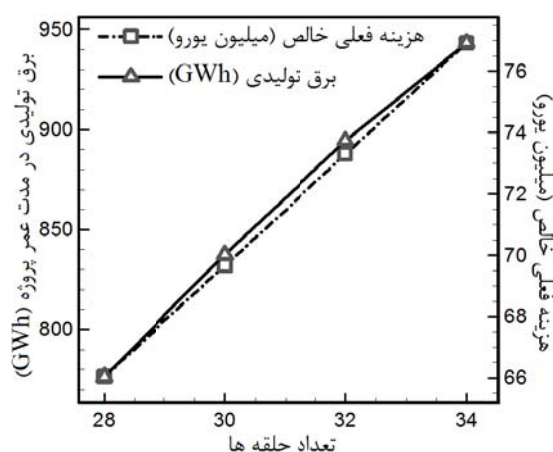
۸- نتیجه گیری

این مقاله بهینه‌سازی اقتصادی اندازه مزرعه خورشیدی سهموی خطی تلفیق شده با یک نیروگاه سیکل ترکیبی را ارائه می‌دهد. مرحله اول در انجام این کار محاسبه رفتار حرارتی سیستم‌های مختلف موجود در نیروگاه در حالت بار نامی و بار جزئی است. کلکتور نیز یکی از این سیستم‌ها می‌باشد که مدل‌سازی کلکتور خورشیدی سهموی خطی در این مقاله ارائه شده است. از آنجا که این مطالعه بر مبنای شبیه‌سازی عملکرد سالیانه است، محاسبه توان حرارتی نیروگاه در هر لحظه ضروری است. برای این منظور شبیه‌سازی یک مزرعه خورشیدی تلفیق شده با یک سیکل ترکیبی با کدنویسی در محیط نرم‌افزار ای‌ای‌اس انجام شده است.

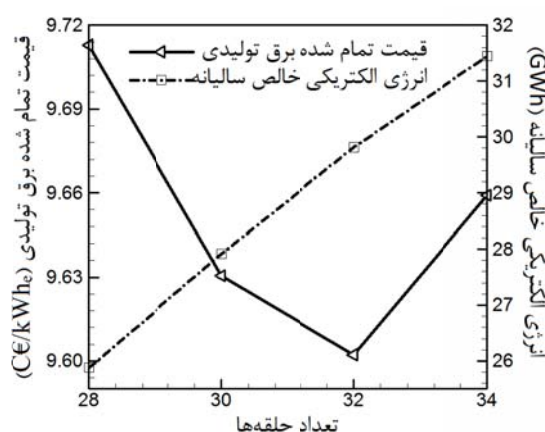
تولید سالیانه برق برای چهار اندازه در نظر گرفته شده برای مزرعه خورشیدی محاسبه شد و تحلیل اقتصادی برای هر یک انجام گرفت. طبق نتایج این تحلیل، اندازه بهینه مزرعه بدست آمد، یعنی اندازه مزرعه‌ای که کمترین قیمت تمام شده تولید برق را نتیجه می‌دهد. در این مورد ویژه اندازه بهینه مزرعه خورشیدی ۳۲ حلقه خورشیدی می‌باشد. که هر حلقه از چهار مجموعه کلکتور ۱۵۰ متری مدل ای تی ۱۵۰ تشکیل شده است. برای شرایط موجود در نیروگاه یزد با تغییر اندازه مزرعه، کمترین قیمت تولید برق ۹/۶۸ می‌باشد. اگرچه با کاهش تعداد حلقه‌ها از ۳۲ حلقه به ۳۰ و ۲۸ حلقه هزینه سرمایه‌گذاری کاهش می‌یابد، ولی قیمت تمام شده تولید برق افزایش می‌یابد که علت این امر در قسمت ۷ به طور کامل توضیح داده شده است. همچنین طبق کار انجام شده، اندازه اقتصادی مزرعه به چندین فاکتور بستگی دارد. توان درخواستی اچ‌آراس‌جی و قیود بلوک قدرت و مزرعه خورشیدی از جمله فاکتورهای مؤثر بر اندازه اقتصادی مزرعه می‌باشند. بنابراین، اگر تجهیزات مزرعه، برای نمونه مبدل حرارتی، تغییر داده شود، ممکن است اندازه اقتصادی مزرعه خورشیدی تغییر کند.

۹- فهرست علائم

$A_{\text{collector}}$	مساحت دهانه دید یک مجموعه کلکتور (m^2)
$A_{\text{cs,b}}$	کمترین مساحت مقطع عرضی اتصالات (m^2)
A_{field}	مساحت دهانه دید مجموع کلکتورهای یک مزرعه (m^2)
D	قطر لوله (m)



شکل ۹ هزینه فعلی خالص و برق تولید شده در طول عمر پروژه به ازای اندازه‌های مختلف مزرعه خورشیدی



شکل ۱۰ انرژی الکتریکی تولیدی سالیانه و قیمت تمام شده برق برای اندازه‌های مختلف مزرعه خورشیدی

می‌توان گفت برای هر نیروگاه خورشیدی با توجه به راندمان تجهیزات بلوک قدرت و توان درخواستی نیروگاه یک مقدار بهینه برای اندازه مزرعه وجود دارد که علاوه بر این که توان مورد نیاز و انرژی تضمینی سالانه را تامین می‌کند، کمترین قیمت تولید برق را نیز نتیجه می‌دهد.

DNI	شدت تابش مستقیم عمودی ($W m^{-2}$)	داخلی پوشش شیشه‌ای (W)
DNI_{min}	کمترین شدت تابش مستقیم عمودی قابل جذب توسط مزرعه خورشیدی ($W m^{-2}$)	انتقال حرارت تشعشی از سطح خارجی لوله جاذب به سطح داخلی پوشش شیشه‌ای (W)
$EndLoss$	فاکتور عملکردی که تابش از دست رفته در انتهای هر ردیف کلکتور را محاسبه می‌کند	انتقال حرارت رسانشی در دیواره پوشش شیشه‌ای (W)
$\dot{E}_{ac}$	توان حرارتی جمع شده (W)	انتقال حرارت جابجایی از سطح خارجی پوشش شیشه‌ای به محیط (W)
$\dot{E}_{in}$	توان حرارتی سیال در ورودی حلقه خورشیدی (W)	انتقال حرارت جابجایی از سطح خارجی پوشش شیشه‌ای به آسمان (W)
$\dot{E}_{out}$	توان حرارتی سیال در خروجی حلقه خورشیدی (W)	
E_t	تولید برق در سال t (MWh)	$\dot{q}_{cond, bracket}$ اتلاف حرارت از طریق نگهدارنده‌های HCE (W)
f	ضریب اصطکاک داخل لوله	$\dot{Q}_{Loss}$ توان حرارتی اتلاف شده در مبدل‌های حرارتی (W)
F_t	هزینه سوخت در سال t (€)	$\dot{Q}_{max, SHE}$ بیشترین توان حرارتی مجاز در مبدل حرارتی خورشیدی (MW_{th})
$\bar{h}_b$	ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط اتصالات ($W m^{-2} K^{-1}$)	$\dot{Q}_{oil}$ توان حرارتی تولید شده در مزرعه (W)
h_{in}	انتالپی سیال ورودی به حلقه خورشیدی ($J kg^{-1}$)	$\dot{q}_{sol, a}$ تابش خورشیدی جذب شده در لوله جاذب (W)
h_{out}	انتالپی سیال خروجی از حلقه خورشیدی ($J kg^{-1}$)	$\dot{q}_{sol, g}$ تابش خورشیدی جذب شده در پوشش شیشه‌ای (W)
$I_{cons \& eng}$	هزینه ساخت، مهندسی، و پیشامدهای احتمالی (€)	$\dot{Q}_{water}$ توان حرارتی منتقل شده به قسمت بخار (W)
$I_{evaporator}$	هزینه تبخیر کننده (€)	r نرخ بهره
I_{field}	هزینه مزرعه خورشیدی شامل کلکتورها، پمپینگ و سیستم‌های کنترلی (€)	Ra عدد ریلی
I_{land}	هزینه آماده سازی زمین (€)	Re عدد رینولدز
$I_{preheater}$	هزینه پیش گرمکن (€)	$Rowshadow$ فاکتور عملکردی که برای محاسبه سایه ردیف‌های موازی کلکتور طی اوایل صبح و نزدیک غروب بکار می‌رود
I_t	هزینه‌های سرمایه‌گذاری در سال t (€)	S_t ارزش گردش وجوه در سال t (€)
k	ضریب رسانندگی گرمایی ($W m^{-1} K^{-1}$)	UA ضریب انتقال حرارت کلی مبدل حرارتی خورشیدی ($W K^{-1}$)
k_p	ضریب افت هد در اتصالات	UA_{ref} ضریب انتقال حرارت کلی مبدل حرارتی خورشیدی در حالت طراحی ($W K^{-1}$)
L_{HCE}	طول یک المان کلکتور خورشیدی (m)	v سرعت سیال داخل لوله جاذب ($m s^{-1}$)
M_{equip}	هزینه تجهیزات سالیانه (€)	$V_{max, wind}$ بیشترین سرعت مجاز باد ($m s^{-1}$)
M_{insur}	هزینه بیمه سالیانه (€)	$W_{aperture}$ عرض دهانه دید کلکتور (m)
M_{labour}	حقوق سالیانه هر کارگر (€)	α_{env} ضریب جذب نور پوشش شیشه‌ای
M_t	هزینه‌های تعمیر و نگهداری در سال t (€)	$\Delta L_{aperture}$ طول یک مقطع کلکتور (m)
$\dot{m}$	دبی جرمی سیال در حلقه خورشیدی ($kg s^{-1}$)	ε ضریب زبری لوله (m)
$\dot{m}_{field}$	دبی جرمی سیال در مزرعه ($kg s^{-1}$)	η_{field} راندمان اپتیکی مزرعه
$\dot{m}_{field, ref}$	دبی جرمی سیال در مزرعه در حالت طراحی ($kg s^{-1}$)	η_{HCE} راندمان اپتیکی کلکتور
$\dot{m}_{min, HCE}$	کمترین دبی جرمی مجاز سیال در لوله جاذب ($kg s^{-1}$)	μ ویسکوزیته ($N s m^{-2}$)
$\dot{m}_{st, min}$	کمترین دبی جرمی مجاز سیال در مبدل حرارتی خورشیدی ($kg s^{-1}$)	θ زاویه تابش (deg)
$\dot{m}_{st, max}$	بیشترین دبی جرمی مجاز سیال در مبدل حرارتی خورشیدی ($kg s^{-1}$)	
n	عمر پروژه (سال)	
$N_{collector}$	تعداد کلکتورها در یک حلقه	
N_{labour}	تعداد کارگر	
N_{loop}	تعداد حلقه‌ها در یک مزرعه	
Nu	عدد نوسلت	
P_b	محیط پایه نگهدارنده لوله جاذب (m)	
P_e	توان الکتریکی مزرعه (kW)	
Pr	عدد پرانتل	
$\dot{q}_{21conv}$	انتقال حرارت جابجایی بین سیال و سطح داخلی لوله جاذب (W)	
$\dot{q}_{32cond}$	انتقال حرارت رسانشی در دیواره لوله جاذب (W)	
$\dot{q}_{34conv}$	انتقال حرارت جابجایی از سطح خارجی لوله جاذب به سطح	

۱۰- مراجع

- [1] G. Heidarinejad, H. Pasharshahi, K. Mazaheri, Evaluation of induced-flow in two-room compartment fire using large eddy simulation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2013. (In Persian)
- [2] A. Giostri, M. Binotti, M. Astolfi, P. Silva, E. Macchi, G. Manzolini, Comparison of different solar plants based on parabolic trough technology, *Solar Energy*, 2012.
- [3] A. Poulikkas, Economic analysis of power generation from parabolic trough solar thermal plants for the Mediterranean region—A case study for the island of Cyprus, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 2474-2484, 2009.
- [4] R. V. Padilla, G. Demirkaya, D. Y. Goswami, E. Stefanakos, M. M. Rahman, Heat transfer analysis of parabolic trough solar receiver, *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 5097-5110, 2011.
- [5] W. Huang, P. Hu, Z. Chen, Performance simulation of a parabolic trough solar collector, *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 746-755, 2012.

- [14] A. Aba'nades, J. Mart'nez-Val, M. Valde's, M. Montes, Solar multiple optimization for a solar-only thermal power plant, using oil as heat transfer fluid in the parabolic trough collectors, *Solar Energy*, No. 83, pp. 2165-2176, 2009.
- [15] H. Price, D. Kearney, *Reducing the Cost of Energy from Parabolic Trough SolarPower Plants*, Hawaii Island, January 2003.
- [16] F. Burkholder C. Kutscher, Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver, *U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2009.
- [17] R. V. Padilla, *Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants*, Doctor of Philosophy thesis, 2011.
- [18] Fichtner Solar-Monenco Consortium, *Engineering and Design documents of yazd solar thermal power plant*, Fichtner Solar-Monenco Consortium, Technical 2012.
- [19] Aries-Monenco Consortium, *Engineering and design documents of Yazd solar thermal power plant*, Aries-Monenco Consortium, Technical 2012.
- [20] *Renewable energy technologies: Cost analysis series*, Vol. *Power Sector*, No. 2/5, June 2012.
- [6] Z. Cheng, Y. He, F. Cui, R. Xu, and Y. Tao, Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method, *Solar Energy*, 2012.
- [7] A. Scott, R. Pitz-Paal, P. Schwarzbözl, N. Blair, R. J. Cable, TRNSYS Modeling of the SEGS VI Parabolic Trough Solar Electric Generating System., in *Proceedings of Solar Forum 2001*, Washington, D.C., April 2001.
- [8] A. M. PATNODE, *Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants*, MS thesis, MIT University, 2006.
- [9] R. Forristall, Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Colorado, 2003.
- [10] N. Blair, M. Mehos, C. Christensen, *Sensitivity of Concentrating Solar Power trough performance, cost, and financing with the Solar Advisor Model*, 2008.
- [11] National Renewable Energy Laboratoty (NREL), *Solar Advisor Model CSP Reference Manual for Version 3.0*, 2009.
- [12] G. Cohen, D. Kearney, G. Kolb, *Final report on the Operation and Maintenance Improvement program for CSP Plants*, Albuquerque, SAND99-1290, 1999.
- [13] R. Pitz-Paal, J. Dersch, B. Milow, F. T'el'ez, A. Ferriere, U. Langnickel, A. Steinfeld, J. Karni, E. Zarza, O. Popel, Development Steps for Parabolic Trough Solar Power Technologies With Maximum Impact on Cost Reduction, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 129, No. 4, pp. 371-377, 2007.