



Effect of Using Two Solar Fields in Fresnel Solar Power Plant with Direct Steam Generation

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Khajepour S.¹ MSc,
Ameri M.*¹ PhD

How to cite this article

Khajepour S, Ameri M. Effect of Using Two Solar Fields in Fresnel Solar Power Plant with Direct Steam Generation. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(1):11-19.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Postal Code: -
Phone: +98 (34) 32111763
Fax: +98 (34) 32120964
ameri_mm@uk.ac.ir

Article History

Received: September 17, 2018
Accepted: October 02, 2018
ePublished: January 11, 2018

ABSTRACT

In this research, the effect of using two solar fields in a solar thermal power plant was evaluated. The average price of natural gas in the last decade was 3.5 dollar/MMBTU. Due to the complexities of the solar power plant, two methods were introduced to optimize the area of the solar fields. Then, for further evaluation of the solar power plant with two distinct solar fields, the plant was examined for two natural gas prices of 3.5 and 9 dollar/MMBTU. The results of the study show that the use of two separate solar fields to produce high pressure steam turbines and low pressure over the use of a solar field reduces the cost of generating electricity. Although each solar field must produce different energy quantities, and the area of each of the fields is different, the size of the field coefficient of the field was the same for both solar fields.

Keywords Hybrid System; LFR Solar Collector; Solar Thermal Power Plant

CITATION LINKS

[1] Modeling and performance simulation of 100 MW LFR based solar thermal power plant in Udaipur India [2] Benchmark of concentrating solar power plants: Historical, current and future technical and economic development [3] Optimized design of a linear Fresnel reflector for solar process heat applications [4] Optimization of the distribution of small scale linear Fresnel reflectors on roofs of urban buildings [5] Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator [6] Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector [7] Future renewable energy costs: Solar-thermal electricity [Internet] [8] Analysis and comparison of integrated solar combined cycles using parabolic troughs and linear Fresnel reflectors as concentrating systems [9] Conceptual design of small scale multi-generation concentrated solar plant for a medical center in Egypt [10] Comparison of two linear collectors in solar thermal plants: Parabolic trough vs Fresnel [11] Optimal integration of solar energy with fossil fuel gas turbine cogeneration plants using three different CSP technologies in Saudi Arabia [12] Optimal integration of linear Fresnel reflector with gas turbine cogeneration power plant [13] The application of linear Fresnel and parabolic trough solar fields as thermal source to produce electricity and fresh water [14] Energy, exergy, economic, environmental (4E) analyses of a solar organic Rankine cycle to produce combined heat and power [15] Modeling and optimization of the quasi-steady operation of solar power plant equipped with thermal energy storage system. Modares Mechanical Engineering [16] Solar field thermo-economical optimization of Yazd Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) [17] Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria [18] Solar Rankine Cycle (SRC) powered by linear Fresnel solar field and integrated with Multi Effect Desalination (MED) system [19] Projected beam irradiation at low latitudes using Meteororm database

اثر استفاده از دو میدان خورشیدی در نیروگاه خورشیدی فرسئل با تولید بخار مستقیم

صادق خواجہ پور MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

مہران عامری * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

در این پژوهش اثر استفاده از دو میدان خورشیدی در یک نیروگاه حرارتی خورشیدی فرسئل مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط قیمت گاز طبیعی در دهه اخیر، ۳/۵ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو بوده است. در ابتدا با توجه به پیچیدگی‌های نیروگاه خورشیدی، دو روش برای بهینه‌سازی مساحت میدان‌های خورشیدی معرفی شد. سپس برای ارزیابی بیشتر نیروگاه خورشیدی با دو میدان خورشیدی مجزا، این نیروگاه برای دو قیمت گاز طبیعی ۳/۵ و ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از دو میدان خورشیدی مجزا برای تولید بخار مافوق گرم توربین فشار بالا و فشار پایین نسبت به استفاده از یک میدان خورشیدی باعث کاهش هزینه برق تولیدی می‌شود. اگر چه هر میدان خورشیدی باید مقادیر انرژی متفاوتی را تولید کند و مساحت مربوط به هر یک از میدان‌ها متفاوت است، اما اندازه ضریب مساحت میدان برای هر دو میدان خورشیدی یکسان بود.

کلیدواژه‌ها: سیستم هیبریدی، کلکتور خورشیدی فرسئل، نیروگاه حرارتی خورشیدی

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۰

* نویسنده مسئول: ameri_mm@uk.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و پیشرفت فناوری بر میزان انرژی مصرفی افزوده شده است. با توجه به روند رو به کاهش سوخت‌های فسیلی، مشکلات زیست‌محیطی و نوسانات قیمتی این سوخت‌ها، بسیاری از کشورهای پیشرفته توجه خود را به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر معطوف کرده‌اند. انرژی‌های تجدیدپذیری مثل باد و خورشید به صورت پراکنده و گسترده‌ای در سراسر زمین در دسترس هستند. به دلیل ماهیت نوسانی تولید انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر، معمولاً سیستم‌هایی که از این نوع انرژی استفاده می‌کنند دارای قابلیت اطمینان کمی هستند. با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی می‌توان قابلیت اعتماد چنین سیستم‌هایی را افزایش داد. روش‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریسیته معمولاً به دو روش مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مستقیم ذخیره‌سازی انرژی دارای راندمان بالایی هستند، اما در حال حاضر هزینه آنها از روش‌های ذخیره‌سازی غیرمستقیم بیشتر است. دو سیستم نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و ذخیره‌ساز حرارتی خورشیدی از جمله مقبول‌ترین سیستم‌های ذخیره انرژی در جهان هستند. برای مناطقی که دارای تابش خورشیدی زیادی هستند، می‌توان با استفاده از نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی همراه با ذخیره‌ساز حرارتی به سیستمی مقرون به صرفه با ضریب عملکرد بالا دست یافت. محبوب‌ترین نوع کلکتورهای خورشیدی که در نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند، کلکتورهای سهموی خطی، فرسئل و برج خورشیدی هستند.

بیشویی و همکاران^[1] یک نیروگاه ۱۰۰ مگاواتی را برای یکی از مناطق هند مدل‌سازی کرده‌اند. بررسی‌های آنها نشان داده است که نیروگاه‌های حرارتی در مکان‌هایی با تابش خورشید بالا دارای

راندمان بهتری نسبت به سایر نواحی هستند. نتایج بررسی چنانی و همکاران^[2] بیانگر آن بوده است که کلکتورهای سهموی خطی از نظر فنی و اقتصادی به نهایت بلوغ و پیشرفت خود رسیده‌اند. سیال عامل این کلکتورها معمولاً روغن‌های معدنی بوده که به دلیل سمی و آتش‌زا بودن این سیال عامل، تحقیقات بسیار زیادی برای جایگزینی آنها با یک سیال عامل بی‌خطر انجام شده است. کلکتورهای فرسئل با سیال عامل آب به عنوان یک رقیب جایگزین برای کلکتور سهموی خطی مطرح می‌شود. مهم‌ترین ضعف کلکتورهای فرسئل خطی، راندمان نوری پایین آنها نسبت به راندمان نوری کلکتورهای سهموی خطی است.

بررسی‌های سیستم‌های خورشیدی نشان داده که هزینه اولیه سرمایه‌گذاری برای کلکتورهای فرسئل خطی نسبت به سایر کلکتورهای خورشیدی کمتر بوده است و با توجه به تحقیقاتی که روی این نوع کلکتورها صورت می‌گیرد^[3-6]، پیش‌بینی می‌شود که در سال ۲۰۲۵ هزینه تولید برق (LCOE) به واسطه کلکتورهای فرسئل خطی نسبت به زمان حال ۲۳/۶٪ کاهش یابد^[7].

با ترکیب کلکتورهای سهموی خطی یا فرسئل خطی با نیروگاه‌های حرارتی می‌توان سوخت مصرفی این نیروگاه‌ها را کاهش داد. بیشترین مزیت استفاده از این ترکیب برای مناطقی با آب‌وهوای گرم است، زیرا راندمان نیروگاه‌های حرارتی سنتی با افزایش دمای هوای محیط کاهش می‌یابد^[8].

رادی و همکاران^[9] یک نیروگاه حرارتی خورشیدی را بررسی کرده و نشان داده‌اند که با استفاده از کلکتور فرسئل به جای کلکتور سهموی خطی، سهم انرژی خورشیدی تا حدود ۵۰٪ کاهش می‌یابد. این کاهش با افزایش مساحت میدان خورشیدی کلکتورهای فرسئل جبران می‌شود. گیوستری و همکاران^[10] یک نیروگاه حرارتی خورشیدی ۵۰ مگاواتی بدون ذخیره‌ساز را یک‌بار با استفاده از کلکتور سهموی خطی و یک‌بار با کلکتور فرسئل شبیه‌سازی نمود و نشان داده‌اند که در شرایط طراحی، راندمان نوری و راندمان خالص تولید الکتریسیته برای حالت استفاده از کلکتور فرسئل به ترتیب ۶۷/۰٪ و ۱۹/۲۵٪ و حالت کلکتور سهموی خطی به ترتیب ۷۵/۰٪ و ۲۳/۶٪ است. در شرایط غیرطراحی، اختلاف راندمان بین دو نوع کلکتور افزایش می‌یابد. دلیل این امر تأثیرپذیری زیاد میدان خورشیدی به زاویه تابش خورشید است. به طور کلی، متوسط راندمان نوری و راندمان خالص تولید الکتریسیته برای حالت استفاده از کلکتور فرسئل به ترتیب ۳۸/۸٪ و ۱۰/۲٪ و حالت کلکتور سهموی خطی به ترتیب ۵۲/۷٪ و ۱۶/۰٪ است. با این وجود، به دلیل هزینه اولیه کم کلکتورهای فرسئل، این نوع از کلکتورها از نظر اقتصادی امیدوارکننده هستند و تحقیقات زیادی برای افزایش راندمان کلکتورهای فرسئل در حال انجام است. بررسی موخیمیر و همکاران^[11] برای سه نوع نیروگاه خورشیدی فرسئل خطی، سهموی خطی و برج خورشیدی نشان‌دهنده آن است که سهم انرژی خورشیدی با کوچک شدن اندازه توربین بخار برای حالت استفاده از کلکتور فرسئل یا سهموی خطی، رابطه مستقیم و در صورت استفاده از برج خورشیدی، رابطه عکس دارد. همچنین باید از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی، استفاده از کلکتور فرسئل و سهموی خطی نسبت به استفاده از برج خورشیدی مورد توجه بیشتری قرار گیرند. دیوان و موخیمیر^[12] ضمن تایید نتایج موخیمیر و همکاران^[11] مبنی بر آن که میزان سهم انرژی خورشیدی و میزان کاهش تولید کربن‌دی‌اکسید هنگام ترکیب کلکتور فرسئل با نیروگاه‌های کوچک بسیار بیشتر از ترکیب این کلکتورها با نیروگاه‌های بزرگ است، نشان داده‌اند که استفاده از کلکتور فرسئل

رابطه ۲:

$$Q_{in} = \eta_{opt} \cdot \eta_{endloss} \cdot Q_{absorbed}$$

$Q_{absorbed}$ ، تشعشع تابیده شده به میدان خورشیدی است و توسط رابطه ۳ و با ضرب مساحت میدان خورشیدی A_{field} در تشعشع نرمال خورشیدی (DNI) به دست می آید:
رابطه ۳:

$$Q_{absorbed} = A_{field} \cdot DNI$$

در رابطه ۲، η_{opt} و $\eta_{endloss}$ راندمان های نوری و اتلافات انتهای کلکتور هستند که توسط روابط ۴ و ۵ محاسبه می شوند.
رابطه ۴:

$$\eta_{endloss} = 1 - \tan(\theta_i) \cdot \frac{L_f}{L}$$

θ_i ، زاویه اشعه خورشید با بردار نرمال سطح کلکتور، L طول دریافت کننده و L_f فاصله کانونی آینه ها تا لوله جاذب است. راندمان نوری کلکتور توسط رابطه ۵ محاسبه می شود [9]:
رابطه ۵:

$$\eta_{opt} = \eta_{opt0} \cdot IAM_t \cdot IAM_L$$

η_{opt0} ، معرف بازده نوری در زاویه برخورد تابش خورشیدی صفر است و از زاویه اصلاحی برخورد طولی و عرضی (IAM_t و IAM_L) برای محاسبه اتلافات نوری استفاده می شود.

حرارت Q_{hlHFT} اتلافی از دریافت کننده خطی در خط کانونی کلکتور است. مقادیر Q_{hlHFT} توسط معادله ۶ محاسبه می شود که توسط آزمایشگاه انرژی های تجدیدپذیر (NREL) آرایه شده است [17]:
رابطه ۶:

$$Q_{hlHFT} = A_0 + A_1(T_{HFT} - T_{amb}) + A_2 \cdot T_{HFT}^2 + A_3 \cdot T_{HFT}^3 + A_4 \cdot IAM_t \cdot IAM_L \cdot T_{HFT}^4 + \sqrt{V_w} \cdot (A_5 + A_6 \cdot (T_{HFT} - T_{amb}))$$

مقادیر ضرایب ثابت A_0, A_1, \dots و A_6 برای دریافت کننده مورد بررسی آرایه شدند (جدول ۱).

جدول ۱) ضرایب اصلاح حرارتی برای PTR70 2008

PTR70 2008	ضرایب تصحیح حرارتی
۴/۰۵	A_0
۰/۲۴۷	A_1
-۰/۰۰۱۴۶	A_2
-۰۰۶e۷/۶۵	A_3
-۰۰۸e۷/۶۲	A_4
-۱/۷	A_5
۰/۰۲۵	A_6

و نهایتاً $Q_{hlpiping}$ نیز حرارت اتلافی از لوله های سیستم است که برابر با مقادیر ۱۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته می شود.

در نیروگاه حرارتی خورشیدی سه مقدار سهم انرژی خورشیدی، مقدار ناکانونی و ضریب مساحت میدان خورشیدی (SM) مورد اهمیت هستند. این مقادیر طبق روابط ۷ تا ۹ تعریف شده اند [18]:
رابطه ۷:

$$\text{انرژی تامین شده توسط سوخت فسیلی - انرژی مورد نیاز کل} = \text{سهم انرژی خورشیدی} \\ \text{انرژی مورد نیاز کل}$$

رابطه ۸:

$$\text{انرژی خورشیدی جذب شده توسط کلکتور - انرژی خورشیدی تابیده شده به سطح کلکتور} = \text{ناکانونی} \\ \text{انرژی خورشیدی تابیده شده به سطح کلکتور}$$

خطی همراه با نیروگاه سوخت فسیلی می تواند باعث کاهش ۷۶ تا ۸۵٪ هزینه تولید برق در مقایسه با نیروگاه حرارتی خورشیدی بدون استفاده از سوخت فسیلی شود. همچنین استفاده از کلکتورهای فرسnel خطی برای کاهش میزان تولید کربن دی اکسید (به خصوص برای نیروگاه های کوچک) از منظر اقتصادی بهتر از استفاده از سیستم های جاذب کربن دی اکسید است. عسکری و عاصری [13] یک نیروگاه حرارتی خورشیدی با دو میدان مجزا را بررسی کرده اند. آنها از یک میدان برای تولید انرژی و از میدان دیگر برای ذخیره انرژی برای زمان هایی که میدان اول قادر به تامین انرژی مورد نیاز سیستم نیست، استفاده کرده اند. هر چند استفاده از کلکتور فرسnel به جای کلکتور سهموی خطی برای این دو میدان خورشیدی باعث افزایش مساحت میدان خورشیدی می شود، اما هزینه تولید برق را کاهش می دهد.

استفاده از انرژی خورشیدی به جای سوخت های فسیلی اگر چه باعث افزایش هزینه تولید برق و هزینه اولیه نیروگاه می شود، اما به دلیل کاهش تولید آلاینده های زیست محیطی موجب کاهش هزینه های خارجی مانند هزینه های مربوط به حوزه سلامت می شود [14-16].

با توجه به تحقیقات انجام شده، تاکنون مقالات زیادی به بررسی مقایسه فنی و اقتصادی استفاده از کلکتور سهموی خطی و فرسnel خطی برای نیروگاه های حرارتی خورشیدی پرداخته اند و همه بررسی ها نشان داده است که هر چند راندمان کلکتور سهموی خطی بیشتر است، اما استفاده از کلکتور فرسnel خطی مقرون به صرفه تر است.

تاکنون اثر استفاده هم زمان از دو میدان خورشیدی برای تولید بخار مورد نیاز توربین فشار بالا و فشار پایین بررسی نشده است، بنابراین در این پژوهش اثر استفاده هم زمان از دو میدان خورشیدی برای توربین فشار بالا و فشار پایین در یک نیروگاه حرارتی ۸۹ مگاواتی با استفاده از کلکتور خورشیدی فرسnel خطی و سیستم سوخت فسیلی پشتیبان بررسی شد.

۲- اجزای اصلی نیروگاه حرارتی خورشیدی کلکتور خورشیدی

از میان کلکتورهای خورشیدی، سه نوع کلکتور خورشیدی سهموی خطی، فرسnel و برج خورشیدی بیشترین استفاده را در نیروگاه های حرارتی خورشیدی دارند که در این میان به دلیل هزینه کمتر کلکتور فرسnel نسبت به سایر کلکتورها، از این نوع کلکتور برای پژوهش حاضر استفاده شد.

کلکتور فرسnel خطی

این کلکتور از چند ردیف آینه تخت بلند با پهنای کم تشکیل شده است که روی یک پایه تخت قرار گرفته اند. این آینه ها نور خورشید را به روی لوله جاذب حرارت منعکس می کنند و دمای سیال عبوری از آن را به ۱۵۰ تا ۵۲۰°C می رسانند. این کلکتورها به دلیل ثابت بودن لوله جاذب بر خلاف کلکتورهای سهموی خطی با مشکلات آب بندی لوله های جاذب روبه رو نیستند و می توانند برای تولید مستقیم بخار مافوق گرم استفاده شوند. میزان حرارت مفید جذب شده توسط این کلکتورها را می توان با رابطه ۱ نشان داد:
رابطه ۱:

$$Q_{LFR} = Q_{in} - Q_{hlHFT} - Q_{hlpiping}$$

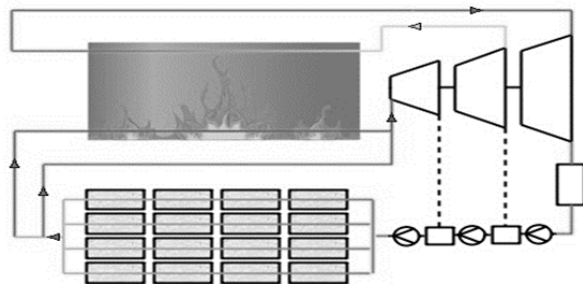
Q_{in} ، تشعشع حرارتی خورشیدی جذب شده توسط کلکتور خورشیدی است و توسط مشخصات نوری میدان خورشیدی و مشخصات مدل راندمان مشخص می شود.

مدل دوم: استفاده از یک میدان خورشیدی برای تولید بخار مستقیم فشار پایین (میدان دوم)

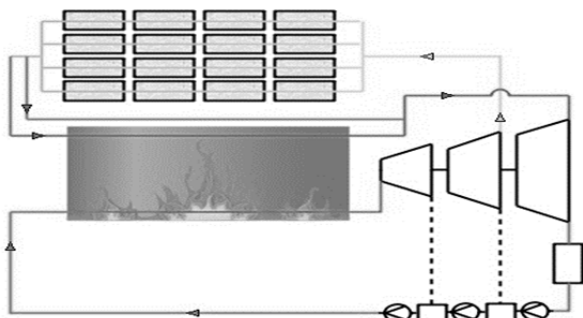
این حالت شبیه به حالت قبل است با این تفاوت که بخشی از انرژی مورد نیاز توربین فشار پایین به واسطه کلکتور خورشیدی فرسنگل و مابقی انرژی مورد نیاز توربین فشار پایین و توربین فشار بالا توسط بویلر سوخت فسیلی تامین می‌شود (شکل ۲).

مدل سوم: استفاده از دو میدان خورشیدی برای تولید مستقیم بخار مورد نیاز توربین فشار بالا و فشار پایین

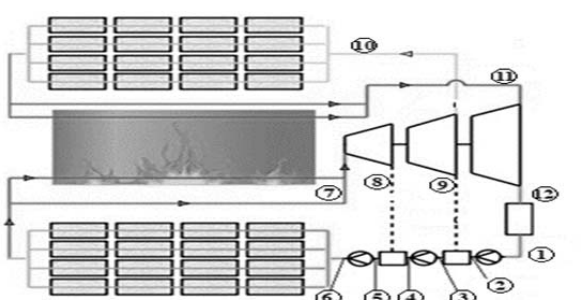
در این مدل از ذخیره‌ساز حرارتی استفاده نمی‌شود و اگر انرژی تولیدی کلکتور خورشیدی بیش از انرژی مورد نیاز باشد، سیستم با اعمال ناکانونی، میزان انرژی جذب‌شده توسط خورشید را کاهش می‌دهد. نوع دیگر ناکانونی به دلایلی همچون غیرعمد اتفاق می‌افتد و این نوع ناکانونی را می‌توان یک نوع خطای انحراف نوری دانست. از انرژی تابیده‌شده خورشید به سطح کلکتور به دلیل عدم طراحی دقیق منعکس‌کننده، مشکلات ساخت، پوشش سطحی منعکس‌کننده، خطای ردیاب خورشیدی و غیره، تنها مقداری از این انرژی جذب می‌شود (شکل ۳؛ جدول ۲). مقدار راندمان توربین بخار و پمپ برای نیروگاه حرارتی مورد بررسی برابر با ۸۵٪ و در نتیجه راندمان نیروگاه ۳۱٪ بود.



شکل ۱) نیروگاه حرارتی خورشیدی با یک میدان خورشیدی برای تولید بخار مستقیم توربین فشار بالا



شکل ۲) نیروگاه حرارتی خورشیدی با یک میدان خورشیدی برای تولید بخار مستقیم توربین فشار پایین



شکل ۳) استفاده از دو میدان خورشیدی برای تولید مستقیم بخار مورد نیاز توربین فشار بالا و فشار پایین

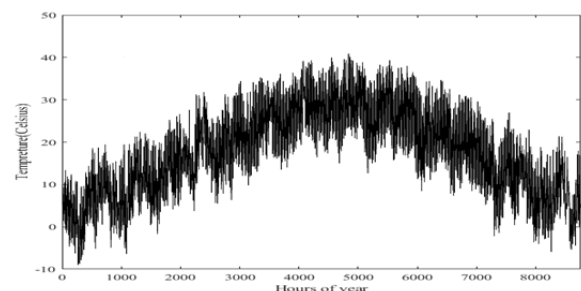
$$\text{مساحت مورد نیاز برای کلکتور در حالت طراحی} = \frac{\text{ضریب مساحت خورشیدی}}{\text{مساحت واقعی استفاده‌شده برای کلکتور}}$$

۳- شبیه‌سازی سیستم

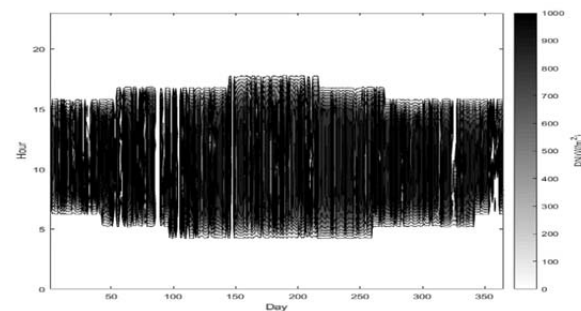
در این پژوهش چندین مدل مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی نیروگاه‌های خورشیدی در گذشته تنها از یک میدان خورشیدی استفاده می‌شد، ولی در مقالات جدید اثر استفاده از یک نوع کلکتور خورشیدی با دو میدان خورشیدی مجزا، یکی برای تولید انرژی مورد نیاز نیروگاه حرارتی در ساعات روز و دیگری برای ذخیره‌سازی انرژی برای ساعات شب و زمان‌هایی که میدان خورشیدی اول نمی‌تواند انرژی حرارتی مورد نیاز نیروگاه را تامین کند، بررسی شده است [13]. در این پژوهش اثر استفاده از دو میدان خورشیدی مجزا برای تولید مستقیم بخار در دو فشار متفاوت ارزیابی شد.

۳-۱- دما و تابش خورشید

میزان تابش خورشیدی در طول سال در استان کرمان (نمودارهای ۱ و ۲) [19] دارای نوسانات زیادی بوده است. اگر در بررسی نیروگاه حرارتی خورشیدی به جای اطلاعات واقعی تابش خورشیدی از اطلاعات مدل‌سازی‌شده تابش خورشیدی برای هوای صاف استفاده شود، نتایج شبیه‌سازی حالتی بسیار ایده‌آل را برای نیروگاه حرارتی خورشیدی نشان می‌دهد و با قیمت‌های گاز کمتری، استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی مقرون‌به‌صرفه است.



نمودار ۱) تغییرات دمای استان کرمان



نمودار ۲) میزان تشعشع مستقیم خورشید برای استان کرمان

۳-۲- میدان‌های خورشیدی

در ادامه سه مدل مختلف برای نیروگاه خورشیدی بررسی می‌شود.

مدل اول: استفاده از یک میدان خورشیدی برای تولید بخار مستقیم فشار بالا (میدان اول)

در این حالت از یک میدان خورشیدی فرسنگل خطی برای تولید مستقیم بخار برای توربین فشار بالا استفاده می‌شود (شکل ۱). بخشی از انرژی مورد نیاز توربین فشار بالا توسط کلکتور خورشیدی فرسنگل و مابقی انرژی مورد نیاز توربین فشار بالا و توربین فشار پایین توسط بویلر سوخت فسیلی تامین می‌شود.

اثر استفاده از دو میدان خورشیدی در نیروگاه خورشیدی فرسئل با تولید بخار مستقیم ۱۵
جدول ۴ ضریب مساحت میدان خورشیدی بهینه برای میدان فشار بالا با تغییر
 قیمت گاز

ناکانونی (%)	سهم انرژی خورشیدی (%)	LCOE (¢/kWh)	ضریب میدان خورشیدی فشار پایین	ضریب میدان خورشیدی فشار بالا	هزینه گاز طبیعی (\$/MMBTU)
۰	۰	۵/۳۲	۰	۰	۲/۵
۰	۰	۵/۹۹	۰	۰	۳
۰/۰۳	۱۵/۶۴	۶/۷۵	۰	۱/۰۵	۳/۵
۰/۶۴	۱۷/۲۰	۷/۲۰	۰	۱/۱۶	۴
۲/۱۱	۱۸/۴۴	۷/۷۵	۰	۱/۲۶	۴/۵
۴/۱۹	۱۹/۶۹	۸/۲۹	۰	۱/۳۸	۵
۵/۸۶	۲۰/۴۹	۸/۸۳	۰	۱/۴۶	۵/۵
۷/۸۱	۲۱/۲۹	۹/۳۶	۰	۱/۵۵	۶
۱۰/۸۸	۲۲/۳۳	۱۰/۴۰	۰	۱/۶۸	۷
۱۳/۹۲	۲۳/۲۱	۱۱/۴۳	۰	۱/۸۱	۸
۱۶/۵۴	۲۴/۴۳	۱۲/۴۶	۰	۱/۹۲	۹
۱۸/۹۳	۲۴/۴۳	۱۳/۴۷	۰	۲/۰۲	۱۰
۲۰/۸۹	۲۴/۸۶	۱۴/۴۸	۰	۲/۱۱	۱۱
۲۲/۹۰	۲۵/۲۶	۱۵/۴۸	۰	۲/۲	۱۲
۲۴/۴۸	۲۵/۵۶	۱۶/۴۷	۰	۲/۲۷	۱۳

جدول ۵ ضریب مساحت میدان خورشیدی بهینه برای هر میدان با تغییر قیمت گاز طبیعی

ناکانونی (%)	سهم انرژی خورشیدی (%)	LCOE (¢/kWh)	ضریب میدان خورشیدی فشار پایین	ضریب میدان خورشیدی فشار بالا	هزینه گاز طبیعی (\$/MMBTU)
۰	۰	۵/۳۲	۰	۰	۲/۵
۰	۰	۵/۹۹	۰	۰	۳
۰/۰۳	۱۸/۶۳	۶/۶۴	۱/۰۵	۱/۰۵	۳/۵
۰/۶۵	۲۰/۴۷	۷/۱۸	۱/۱۴	۱/۱۶	۴
۲/۱۴	۲۱/۹۶	۷/۷۱	۱/۲۶	۱/۲۶	۴/۵
۴/۱۹	۲۳/۴۲	۸/۲۲	۱/۳۵	۱/۳۸	۵
۵/۸۹	۲۴/۳۸	۸/۷۳	۱/۴۳	۱/۴۶	۵/۵
۷/۸۴	۲۵/۳۳	۹/۲۳	۱/۵۴	۱/۵۵	۶
۱۰/۹۲	۲۶/۵۷	۱۰/۲۲	۱/۶۶	۱/۶۸	۷
۱۳/۹۲	۲۷/۶۰	۱۱/۲۰	۱/۸۰	۱/۸۱	۸
۱۶/۵۶	۲۸/۴۰	۱۲/۱۶	۱/۹۱	۱/۹۲	۹
۱۸/۹۷	۲۹/۰۷	۱۳/۱۱	۲/۰۲	۲/۰۲	۱۰
۲۰/۵۹	۲۹/۵۶	۱۴/۰۶	۲/۰۹	۲/۱۱	۱۱
۲۲/۹۱	۳۰/۰۵	۱۵/۰۰	۲/۲	۲/۲	۱۲
۲۴/۵۲	۳۰/۴۱	۱۵/۹۳	۲/۲۷	۲/۲۷	۱۳

برای گاز طبیعی ۳.۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو، در مقدار بهینه SM مربوط به این قیمت گاز طبیعی، مقدار ناکانونی برای هر دو میدان خورشیدی بسیار کوچک و در حد صفر است. با افزایش بیشتر SM، مقادیر ناکانونی به سرعت افزایش یافت (نمودارهای ۳ و ۴).

با افزایش SM، هزینه تولید برق تولیدی کاهش یافت. این کاهش برای هر دو میدان تا SM برابر با ۱/۰۵ ادامه یافت. با افزایش بیشتر SM، هزینه تولید برق با سرعت زیادی شروع به افزایش می‌کند. همچنین میزان تاثیرگذاری میدان خورشیدی فشار بالا بر هزینه برق تولیدی بیشتر از تاثیر میدان خورشیدی فشار پایین بر هزینه برق تولیدی است. دلیل این امر آن است که در SM برابر با یک، مساحت میدان خورشیدی فشار بالا و فشار پایین به ترتیب ۴۵۴۹۰۳ و ۸۶۵۷۸ متر مربع بود. بنابراین مساحت میدان خورشیدی فشار بالا ۵.۲۵ برابر مساحت میدان خورشیدی فشار پایین بوده و لذا تاثیرگذاری آن بر قیمت برق تولیدی با تغییر SM بیشتر است (نمودار ۴).

جدول ۷ اطلاعات ترمودینامیک سیکل رانکین نشان داده شده در شکل ۳

نقطه	فشار (بار)	دما (°C)	نرخ جریان جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)	آنتالپی (کیلوژول بر کیلوگرم)
۱	۰/۳۴	۷۳	۹۶/۴۵	۳۰۳/۱۵
۲	۱۰	۷۳/۲	۹۶/۴۵	۳۰۵/۸
۳	۱۰	۱۹۸	۱۲۴/۶۳	۸۴۴/۹
۴	۴۰	۱۹۹	۱۲۴/۶۳	۸۴۹/۳
۵	۴۰	۲۵۰	۱۳۷/۳۳	۱۰۸۷
۶	۱۰۰	۲۵۳	۱۳۷/۳۳	۱۰۹۹
۷	۱۰۰	۳۷۷	۱۳۷/۳۳	۳۰۲۳
۸	۴۰	۲۶۴	۱۲/۶۷	۲۸۵۰
۹	۱۰	۱۹۸	۲۸/۱۸	۲۶۹۰
۱۰	۱۰	۱۹۸	۹۶/۴۵	۲۶۹۰
۱۱	۱۰	۳۷۷	۹۶/۴۵	۳۲۰۷
۱۲	۰/۳۴	۷۳	۹۶/۴۵	۲۶۳۱

۴- شبیه‌سازی سیستم و نتایج

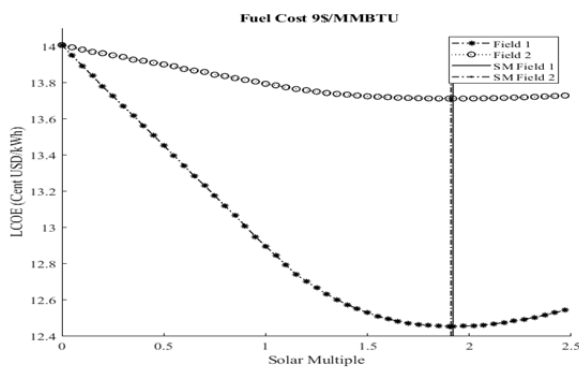
هزینه گاز طبیعی در ده سال گذشته از مقادیر ۱۳ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو به مقادیر ۲۷ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو رسیده است. مقدار متوسط هزینه گاز طبیعی در چند سال اخیر، ۳/۵ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو بوده است. با توجه به روند تغییرات قیمت گاز طبیعی بسیار بعید است که قیمت گاز طبیعی فراتر از مقادیر ۹ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو برسد. بنابراین در این بررسی سه مدل معرفی شده در قسمت قبل، برای قیمت‌های ۳/۵ و ۹ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو گاز طبیعی مورد بررسی بیشتری قرار گرفت. برای نمایش تاثیرات ضریب مساحت میدان خورشیدی روی میزان سهم انرژی خورشیدی، ناکانونی و قیمت برق تولیدی، در ابتدا اثر استفاده از یک میدان خورشیدی بدون توجه به میدان خورشیدی دیگر مورد توجه قرار گرفت که در این پژوهش به‌عنوان روش اول بیان شد. در این روش در ابتدا یک‌بار ضریب مساحت میدان خورشیدی فشار پایین (SMPL) برابر با صفر قرار گرفته شد و اثر تغییر ضریب مساحت میدان خورشیدی فشار بالا (SMHP) مورد ارزیابی قرار گرفت و در ادامه SMHP برابر با صفر قرار داده شد و اثر SMPL مورد ارزیابی قرار گرفت. اعداد (جدول‌های ۵-۳) نشان می‌دهند که مقادیر بهینه برای SM هر دو میدان فشار بالا و فشار پایین یکسان است.

جدول ۳ ضریب مساحت میدان خورشیدی بهینه برای میدان فشار پایین با تغییر قیمت گاز

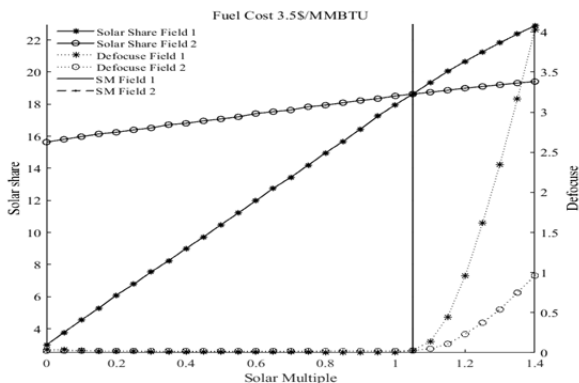
هزینه گاز طبیعی (\$/MMBTU)	ضریب میدان خورشیدی فشار بالا	ضریب میدان خورشیدی فشار پایین	LCOE (¢/kWh)	سهم انرژی خورشیدی (درصد)	ناکانونی (درصد)
۲/۵	۰	۰	۵/۳۲	۰	۰
۳	۰	۰	۵/۹۹	۰	۰
۳/۵	۰	۱/۰۵	۶/۷۵	۲/۹۹	۰/۰۴
۴	۰	۱/۱۴	۷/۳۰	۳/۲۷	۰/۷۲
۴/۵	۰	۱/۲۶	۷/۹۵	۳/۵۲	۲/۳۲
۵	۰	۱/۳۵	۸/۵۹	۳/۷۳	۴/۱۸
۵/۵	۰	۱/۴۳	۹/۲۳	۳/۸۹	۶/۰۳
۶	۰	۱/۵۴	۹/۸۷	۴/۰۵	۸/۰۱
۷	۰	۱/۶۶	۱۱/۱۶	۴/۲۴	۱۱/۰۹
۸	۰	۱/۸۰	۱۲/۴۴	۴/۴۰	۱۳/۹۴
۹	۰	۱/۹۱	۱۳/۷۱	۴/۵۳	۱۶/۶۴
۱۰	۰	۲/۰۲	۱۴/۹۹	۴/۶۴	۱۹/۱۵
۱۱	۰	۲/۰۹	۱۶/۲۶	۴/۷۱	۲۰/۹۳
۱۲	۰	۲/۲	۱۷/۵۴	۴/۷۸	۲۲/۹۳
۱۳	۰	۲/۲۷	۱۸/۸۱	۴/۸۵	۲۴/۷۶

وجود نیامد و تنها تاثیر افزایش قیمت گاز طبیعی، روی هزینه برق تولیدی بود (نمودارهای ۳ و ۵). به عبارت دیگر هر دو نمودار تغییرات سهم انرژی خورشیدی و مقادیر ناکانونی را با تغییر مقدار SM و براساس روش اول برای دو قیمت گاز طبیعی ۳.۵ و ۹ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو نشان دادند و نمودارهای یکسانی هستند که تنها در مقیاس‌های متفاوتی رسم شدند.

برای آن که تاثیر استفاده از یک میدان خورشیدی روی میدان خورشیدی دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد، یک‌بار میدان خورشیدی فشار بالا برابر با مقادیر بهینه محاسبه شده در روش اول (نمودارهای ۴ و ۶) تعیین شد و اثر تغییرات ضریب میدان خورشیدی فشار پایین مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس میدان خورشیدی فشار پایین برابر با مقادیر بهینه محاسبه شده در روش اول تعیین شد و اثر تغییرات ضریب میدان خورشیدی فشار بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش از این روش به‌عنوان روش دوم نام برده شد (نمودار ۷).



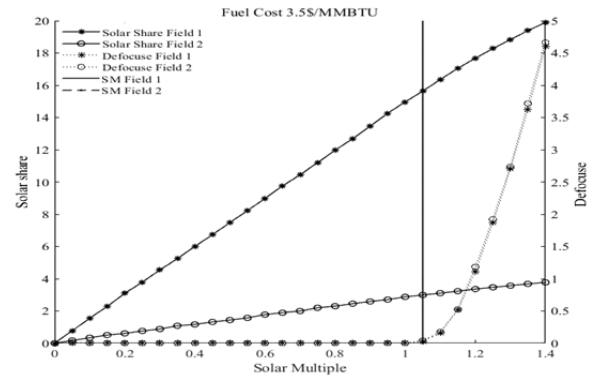
نمودار ۶ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی LCOE براساس راه اول (قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)



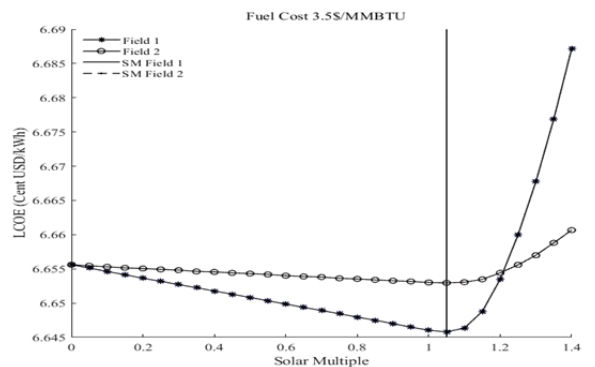
نمودار ۷ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی سهم انرژی خورشیدی و میزان ناکانونی براساس راه دوم (قیمت گاز طبیعی ۳.۵ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)

در راه حل دوم مشاهده شد که ابتدا با افزایش ضریب مساحت خورشیدی، میزان ناکانونی کاهش یافت. دلیل این اتفاق این است که در ابتدا و قبل از افزایش ضریب مساحت میدان خورشیدی مورد بررسی، مقادیر ناکانونی به‌واسطه میدان خورشیدی دیگر وجود دارد. با افزایش مقادیر SM بر میزان سهم انرژی خورشیدی و ناکانونی میدان خورشیدی مورد بررسی افزوده شد (نمودار ۸). در ابتدا نرخ افزایش میزان سهم انرژی خورشیدی بیش از نرخ افزایش میزان

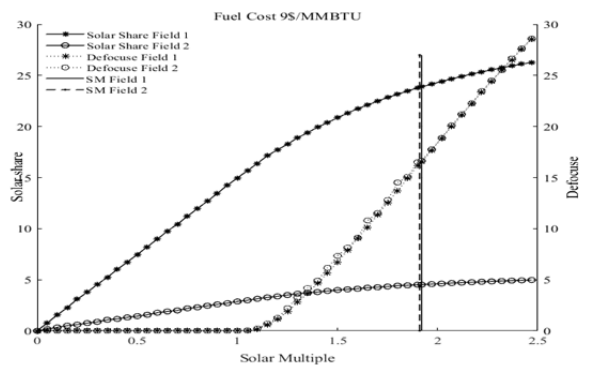
با افزایش هزینه سوخت فسیلی، استفاده بیشتر از انرژی خورشیدی مقرون‌به‌صرفه است. بنابراین با افزایش قیمت گاز طبیعی از ۳/۵ به ۹ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو، SM بهینه، ۸۳٪ شد. در مقادیر بهینه SM مربوط به هر کدام از قیمت‌ها مشاهده شد که با افزایش SM، مقدار ناکانونی نیز افزایش یافت (نمودارهای ۳ و ۵).



نمودار ۳ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی سهم انرژی خورشیدی و میزان ناکانونی براساس راه اول (قیمت گاز طبیعی ۳/۵ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)



نمودار ۴ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی LCOE براساس راه اول (قیمت گاز طبیعی ۳/۵ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)



نمودار ۵ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی سهم انرژی خورشیدی و میزان ناکانونی براساس راه اول (قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به‌ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)

با افزایش قیمت گاز طبیعی و در صورت ثابت‌بودن سایر اجزای سیستم خورشیدی به‌ویژه مساحت میدان خورشیدی یا SM، تغییری در مقادیر سهم انرژی خورشیدی و مقادیر ناکانونی به

طبیعی کاسته شد. این کاهش تا SM بهینه باعث کاهش هزینه برق تولیدی شد و پس از آن به دلیل غالب شدن هزینه‌های میدان خورشیدی بر هزینه گاز طبیعی، هزینه تولید برق افزایش یافت (نمودار ۹). در قیمت‌های پایین گاز طبیعی تا SM بهینه، سرعت کاهش قیمت کم و پس از آن به سرعت قیمت برق تولیدی زیاد شد. با افزایش قیمت گاز طبیعی بر سرعت کاهش قیمت، افزوده و از سرعت افزایش قیمت برق تولیدی کاسته شد (نمودارهای ۹ و ۱۰). بهینه‌سازی هر یک از میدان‌های خورشیدی به صورت مجزا و بدون توجه به میدان‌های خورشیدی دیگر دارای خطای بسیار اندکی بود. دلیل این امر عدم ارتباط هر یک از میدان‌های خورشیدی با میدان خورشیدی دیگر است. بنابراین برای محاسبه ضریب مساحت میدان خورشیدی، روش اول (روش ساده‌تر) توصیه می‌شود (نمودارهای ۶ و ۱۰).

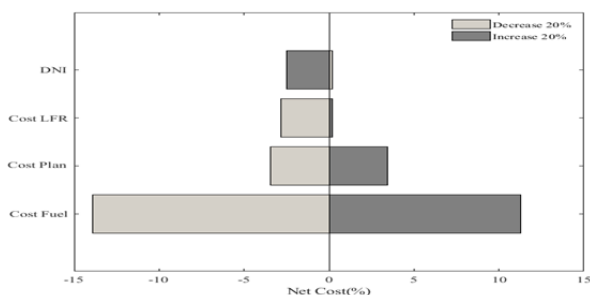
برای قیمت گاز طبیعی ۳/۵ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو، مساحت بهینه میدان خورشیدی اول و دوم به ترتیب ۴۷۷۶۴۸ و ۹۰۹۰۷ متر مربع و برای قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو، مساحت بهینه میدان خورشیدی اول و دوم به ترتیب ۸۷۳۶۳۰ و ۱۶۴۸۷۰ متر مربع بود (جدول‌های ۵-۳).

استفاده تنها از یک میدان خورشیدی باعث افزایش هزینه برق تولیدی شد (جدول‌های ۵-۳). مقرون به صرفه‌ترین سیستم برای تولید انرژی، استفاده هم‌زمان از دو میدان خورشیدی مجزا برای تولید بخار مستقیم توربین فشار بالا و فشار پایین است. نکته جالب این بررسی، یکسان بودن میزان ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی بود.

لازم به ذکر است با توجه به قیمت کنونی گاز طبیعی استفاده از انرژی خورشیدی بدون در نظر گرفتن مسایل زیست‌محیطی، مشوق‌های دولتی و هزینه‌های خارجی مانند هزینه‌های مربوط به حوزه سلامت مقرون به صرفه نیست. حتی با در نظر گرفتن قیمت ۳/۵ دلار بر میلیون بی‌تی‌یو برای گاز طبیعی، استفاده از انرژی خورشیدی برای نیروگاه باعث کاهش ۰/۱۹ درصدی هزینه برق تولیدی نسبت به حالت عدم استفاده از انرژی خورشیدی برای نیروگاه حرارتی می‌شود. با این حال، با توجه به پیچیدگی‌های سیستم خورشیدی، استفاده از انرژی خورشیدی برای قیمت کنونی گاز طبیعی توصیه نمی‌شود.

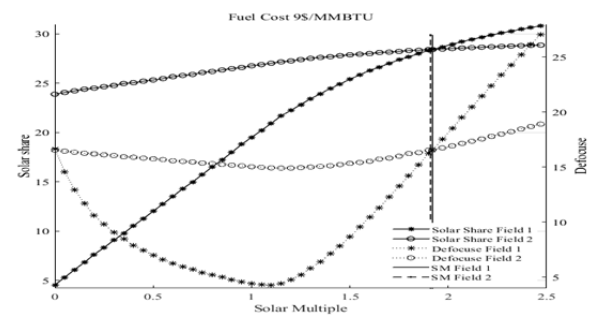
۵- آنالیز حساسیت

اثرات تغییرات ۲۰ درصدی هزینه‌ها و تابش مستقیم خورشید برای بهترین مدل برای دو حالت قیمت گاز طبیعی ۳/۵ و ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو رسم شد. این نمودارها نشان داد که هزینه سوخت برای دو حالت قیمت گاز طبیعی ۳/۵ و ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو، عامل کلیدی در تعیین قیمت برق تولیدی است (نمودارهای ۱۱ و ۱۲).

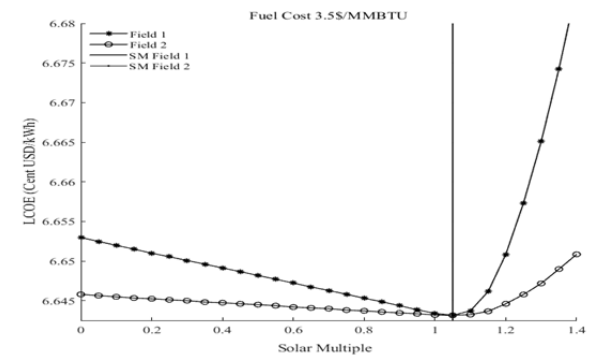


نمودار ۱۱ اثر تغییرات ۲۰ درصدی میزان تابش خورشید، هزینه کلکتور فرسئل، هزینه نیروگاه و هزینه سوخت روی هزینه کل مجموعه (قیمت گاز طبیعی ۳/۵ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)

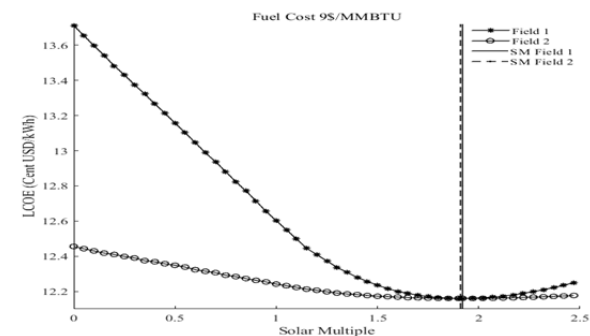
ناکانونی برای میدان خورشیدی مورد بررسی بود و با توجه به رابطه ۸، میزان ناکانونی کل کاهش یافت (نمودار ۵). برای روش اول در SM برابر صفر، دو منحنی مربوط به میدان‌های خورشیدی بر هم منطبق بودند. با افزایش SM فاصله دو منحنی بیشتر شد که در SM بهینه این فاصله به بیشترین مقدار خود رسید و پس از آن با افزایش بیشتر SM، فاصله دو منحنی کاهش یافت (نمودارهای ۴ و ۶). برای روش دوم موضوع کاملاً برعکس بود، یعنی با افزایش SM از مقادیر صفر، فاصله دو منحنی کاهش یافت. در SM بهینه، این دو منحنی بر یکدیگر منطبق شدند. با افزایش بیشتر SM، فاصله دو منحنی افزایش یافت. بنابراین صرفاً برای نشان دادن برابری SM بهینه دو میدان خورشیدی، نمودار LCOE- SM براساس روش دوم توصیه می‌شود (نمودارهای ۹ و ۱۰).



نمودار ۸ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی سهم انرژی خورشیدی و میزان ناکانونی براساس راه دوم (قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)



نمودار ۹ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی LCOE براساس راه دوم (قیمت گاز طبیعی ۳/۵ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)



نمودار ۱۰ اثر تغییرات ضریب مساحت میدان خورشیدی برای هر دو میدان خورشیدی برای بهترین مدل روی LCOE براساس راه دوم (قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)

با افزایش مساحت میدان خورشیدی از میزان استفاده از گاز

این پژوهش تشکر نمایند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده و همچنین جهت بررسی یا چاپ برای نشریه دیگری فرستاده نشده است.

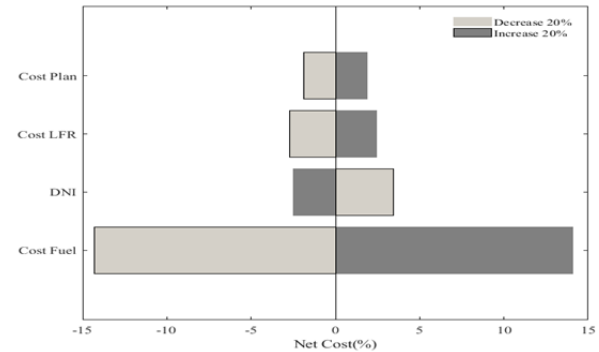
تعارض منافع: بدینوسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

سهم نویسندگان: صادق خواجه‌پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪)؛ مهران عامری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۵۰٪) **منابع مالی:** بدینوسیله از حمایت مالی شرکت سهامی برق منطقه ای کرمان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- 1- Bishoyi D, Sudhakar K. Modeling and performance simulation of 100 MW LFR based solar thermal power plant in Udaipur India. Resource Efficient Technologies. 2017;3(4):365-377.
- 2- Chaanaoui M, Vaudreuil S, Bounahmidi T. Benchmark of concentrating solar power plants: Historical, current and future technical and economic development. Procedia Computer Science. 2016;83:782-789.
- 3- Pulido-Iparraguirre D, Valenzuela L, Serrano-Aguilera JJ, Fernández-García A. Optimized design of a linear Fresnel reflector for solar process heat applications. Renewable Energy. 2019;131:1089-1106.
- 4- Barbón A, Barbón N, Bayón L, Sánchez-Rodríguez JA. Optimization of the distribution of small scale linear Fresnel reflectors on roofs of urban buildings. Applied Mathematical Modelling. 2018;59:233-250.
- 5- Dabiri S, Khodabandeh E, Khoeini Poorfar AR, Mashayekhi R, Toghraie D, Abadian Zade SA. Parametric investigation of thermal characteristic in trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. Energy. 2018;153:17-26.
- 6- Bellos E, Tzivanidis C. Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector. Solar Energy. 2018;173:769-779.
- 7- Renewable Energies. Future renewable energy costs: Solar-thermal electricity [Internet]. Netherlands: KIC InnoEnergy; 2015 [cited 2014, October, 1]. Available from: URL link: http://www.innoenergy.com/wp-content/uploads/2015/01/KIC_InnoEnergy_STE_anticipated_innovations_impact.pdf.
- 8- Rovira A, Barbero R, José Montes M, Abbas R, Varela F. Analysis and comparison of integrated solar combined cycles using parabolic troughs and linear Fresnel reflectors as concentrating systems. Applied Energy. 2016;162:990-1000.
- 9- Rady M, Amin A, Ahmed M. Conceptual design of small scale multi-generation concentrated solar plant for a medical center in Egypt. Energy Procedia. 2015;83:289-298.
- 10- Giostri A, Binotti M, Silva P, Macchi E, Manzolini G. Comparison of two linear collectors in solar thermal plants: Parabolic trough vs Fresnel. Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability ES2011, August 7-10, 2011, Washington, DC, USA. New York City: ASME; 2011.
- 11- Mokheimer EMA, Dabwan YN, Habib MA. Optimal integration of solar energy with fossil fuel gas turbine cogeneration plants using three different CSP technologies in Saudi Arabia. Applied Energy.

برای قیمت‌های پایین گاز طبیعی مهم‌ترین عوامل کلیدی در تعیین قیمت برق تولیدی به ترتیب هزینه سوخت فسیلی، هزینه نیروگاه حرارتی، هزینه کلکتور و در نهایت میزان تابش خورشید است. این در حالی است که با افزایش قیمت گاز طبیعی، مساحت بهینه میدان خورشیدی افزایش می‌یابد و ترتیب عوامل کلیدی به صورت هزینه سوخت فسیلی، میزان تابش خورشید، هزینه کلکتور و هزینه نیروگاه حرارتی تغییر می‌کند.



نمودار ۱۲) اثر تغییرات ۲۰ درصدی میزان تابش خورشید، هزینه کلکتور فرسول، هزینه نیروگاه و هزینه سوخت روی هزینه کل مجموعه (قیمت گاز طبیعی ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر استفاده هم‌زمان از دو میدان خورشیدی برای تامین بخار مورد نیاز توربین فشار بالا و فشار پایین در یک نیروگاه حرارتی خورشیدی با استفاده از کلکتور خورشیدی فرسول خطی و سیستم سوخت فسیلی پشتیبان بررسی شد.

قیمت گاز طبیعی در جهان با تغییرات زیادی همراه بوده و برای SM کمتر از یک، مقادیر ناکانونی در حد صفر است. با افزایش SM از مقادیر صفر تا مقادیر بهینه، هزینه تولید برق به تدریج کاهش و با افزایش بیشتر SM، هزینه تولید برق به سرعت افزایش می‌یابد. به دلیل آن که انرژی مورد نیاز توربین فشار بالا بیشتر از انرژی مورد نیاز توربین فشار پایین است، اثر میدان خورشیدی مربوط به توربین فشار بالا بیشتر از میدان خورشیدی مربوط به توربین فشار پایین است.

دو میدان خورشیدی مجزا با یکدیگر در ارتباط نیستند، در نتیجه نتایج بهینه‌سازی مساحت میدان‌های خورشیدی از طریق روش اول و دوم، مقادیر یکسانی را نشان می‌دهند. بنابراین با توجه به سادگی روش اول، این روش برای بهینه‌سازی چنین نیروگاه‌هایی توصیه می‌شود.

هزینه سوخت فسیلی عامل کلیدی تعیین قیمت برق تولیدی نیروگاه حرارتی است. با افزایش ۲/۵۷ برابری قیمت گاز طبیعی (از ۳.۵ تا ۹ دلار به ازای هر میلیون بی‌تی‌یو)، ۸۰٪ بر مساحت بهینه دو میدان خورشیدی مجزا و هزینه برق تولیدی افزوده می‌شود.

با وجود مساحت‌های بهینه متفاوت برای میدان‌های خورشیدی، ضریب مساحت میدان خورشیدی برای میدان اول و دوم خورشیدی مقادیر یکسانی است. استفاده هم‌زمان از دو میدان خورشیدی تولید مستقیم بخار برای توربین فشار بالا و فشار پایین به جای استفاده تنها از یک میدان خورشیدی باعث کاهش هزینه برق تولیدی نیروگاه می‌شود.

تشکر و قدردانی: بدین وسیله نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی شرکت سهامی برق منطقه‌ای کرمان برای انجام

system. Modares Mechanical Engineering. 2015;15(10):249-258. [Persian]

16- Mehrnia V, Haghghi Khoshkhoo R. Solar field thermo-economical optimization of Yazd Integrated Solar Combined Cycle (ISCC). Modares Mechanical Engineering. 2014;14(2):117-127. [Persian]

17- Achour L, Bouharkat M, Behar O. Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria. Energy Reports. 2018;4:207-217.

18- Askari IB, Ameri M. Solar Rankine Cycle (SRC) powered by linear Fresnel solar field and integrated with Multi Effect Desalination (MED) system. Renewable Energy. 2018;117:52-70.

19- Hatwaambo S, Jain PC, Perers B, Karlsson B. Projected beam irradiation at low latitudes using Meteororm database. Renewable Energy. 2009;34(5):1394-1398.

2017;185(Pt 2):1268-1280.

12- Dabwan YN, Mokheimer EMA. Optimal integration of linear Fresnel reflector with gas turbine cogeneration power plant. Energy Conversion and Management. 2017;148:830-843.

13- Askari IB, Ameri M. The application of linear Fresnel and parabolic trough solar fields as thermal source to produce electricity and fresh water. Desalination. 2017;415:90-103.

14- Ariyanfar L, Yari M, Abdi Aghdam E. Energy, exergy, economic, environmental (4E) analyses of a solar organic Rankine cycle to produce combined heat and power. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(10):229-240. [Persian]

15- Khalilzadeh Bavil V, Mahmoudimehr J. Modeling and optimization of the quasi-steady operation of solar power plant equipped with thermal energy storage