



## شبیه سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه حرارتی خورشیدی

علی کاوسی نژاد، محسن پرور، احسان حسین زاده

هیئت علمی دانشگاه جامع علمی کاربردی و مربی دانشگاه صنعتی جندی شاپور، [alibox2006@yahoo.com](mailto:alibox2006@yahoo.com)

هیئت علمی دانشگاه جامع علمی کاربردی و مربی دانشگاه صنعتی جندی شاپور، [mohsenaria2007@yahoo.com](mailto:mohsenaria2007@yahoo.com)

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، [ehsan.h262@gmail.com](mailto:ehsan.h262@gmail.com)

### چکیده

سیستم های ذخیره انرژی حرارتی در نیروگاهها نقش مهمی در ذخیره انرژی گرمایی ایفا می کند. استفاده از سیستم ذخیره حرارتی توانایی داشتن توان در یک میزان ثابت را علیرغم پراکندگی قابل توجه مقدار تشعشع خورشیدی، فراهم ساخته و می تواند زمان تولید توان را متناسب با نیاز مصرف کننده تغییر دهد. در این مقاله با شبیه سازی یک نیروگاه تولید بخار سهموی خطی با تولید 1mw و دارای مساحت 300m<sup>2</sup> کلتور خورشیدی، به بررسی تاثیر استفاده از سیستم های ذخیره انرژی بر کارکرد نیروگاه در دو حالت هوای ابری و هوای صاف پرداخته می شود. در پایان این نتیجه حاصل می شود که یک سیستم توان خورشیدی متمرکز بدون ذخیره حرارتی، نوسان زیادی در خروجی توان به ویژه در هنگامی که آسمان ابری است خواهد داشت. همچنین اضافه کردن سیستم ذخیره حرارتی سهم انرژی خورشیدی نیروگاه را به میزان 47٪ برای یک بار پایه خروجی توان حرارتی 1MW افزایش می دهد که این امر باعث کاهش میزان مصرف سوخت مکمل به میزان 43٪ می شود.

واژگان کلیدی: ذخیره سازی انرژی، نیروگاه خورشیدی، انرژی حرارتی، شبیه سازی دینامیکی



## مقدمه

منابع انرژی برگشت پذیر طبیعت، مثل خورشید و باد زمانی که با سوخت های فسیلی مقایسه می شوند معایب ذاتی در خود دارند. سوخته های فسیلی الزاماً انرژی ذخیره ای دارند که می توانند در صورت مطالبه از طریق احتراق سوخت گسیل شوند. ذخیره انرژی حرارتی (TES) یا ذخیره انرژی به عنوان حرارت دادن یا خنک کاری، یک تکنولوژی موثر هزینه با پتانسیل کاربرد های زیاد می باشد. (1) سیستم توان خورشیدی متمرکز (CSP) ارزش تکنولوژی ذخیره انرژی حرارتی را نشان می دهد. (2) سیستم توان خورشیدی متمرکز به تشعشع خورشیدی با استفاده از آینه یا لنز ها با حرارت دادن یک سیال برای یک نیروگاه یا دیگر کاربردها متمرکز می شود. (3) بدون ذخیره کردن، خروجی توان از این سیستمها زمانی که یک اختلال در سیستم رخ می دهد، قطع می شود برای مثال، زمانی که خورشید پشت ابر می رود انرژی کمتری موجود است و در نتیجه خروجی توان کاهش می یابد (4) دلیل اینکه تکنولوژیهای سیستم های توان خورشیدی متمرکز هنوز در حال توسعه است، موارد کم سیستم ذخیره انرژی حرارتی با این سیستم ها است که مطالعه شده اند. (تاریخچه این موارد به خوبی در مقاله مدرانو و همکاران (Medrano et al) موجود است. (5)) که مهمترین دلیل آن این است که سطح مدل سازی دینامیکی این سیستمها برای فهمیدن کامل رفتار سیستم ها مهم است و تحقیقات بیشتر، پیشرفت و طراحی چنین نیروگاههایی به دید ما کمک می کند. تعداد زیادی تکنولوژی کنترل پیشرفته با سیستم های توان خورشیدی متمرکز با غلبه بر مسائل پراکنده طبیعت از طریق تشعشع خورشیدی به کار برده شده است. (6). این تکنیک ها به طور کلی بر روی کنترل دمای خروجی کلکتور خورشیدی از طریق تغییر میزان جریان سیال انتقال حرارت (HTF) (قابلیت تغییرات دادن) در میدان کلکتور تمرکز دارد (7). اگر ذخیره انرژی قابل ملاحظه ای وجود نداشته باشد، خروجی توان از نیروگاه متغیر خواهد شد مثل تغییر تابش خورشید. بر عکس، مدلسازی کلکتور خورشیدی با سیستم ذخیره انرژی حرارتی مستقیم با دو تانک یک قابلیت تغییر اضافی بوجود می آورد: میزان جریان از تانک ذخیره به بار مبدل حرارتی یا بویلر است. بنابراین، در همین حال دمای خروجی میدان کلکتور می تواند هنوز کنترل شود. توان دریافت شده و بار می توانند به صورت مستقل کنترل شوند. امکان پایدار نگه داشتن خروجی توان زمانی که آسمان ابری است یا خروجی توان تغییر می کند بهتر می تواند تغییرات مصرف کننده را انجام دهد. سیستم ذخیره انرژی حرارتی فقط قسمتی از کل انرژی سیستم را بیان می کند، برای مدل سازی دینامیکی سیستم کامل ضروری است که فعل و انفعالات اجزای ذخیره انرژی را با دیگر اجزای سیستم درک کنیم. در این مقاله، تمرکز شبیه سازی روی سیستم ذخیره انرژی حرارتی است و اینکه چطور می توان کنترل خروجی توان را بهبود بخشید.

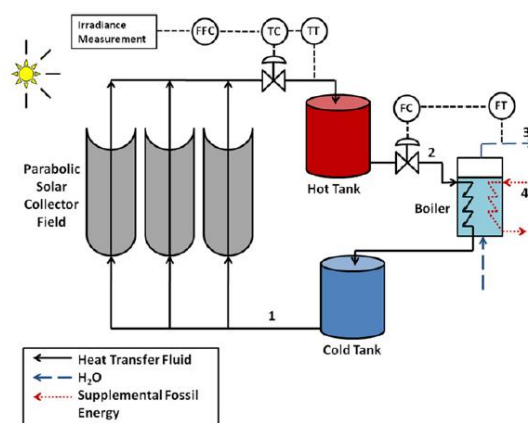
## نمای کلی سیستم

سیستم ذخیره انرژی حرارتی مدلسازی شده در این مقاله از دو تانک ذخیره مستقیم که سیال انتقال حرارت به عنوان واسطه ذخیره انرژی عمل می کند. این سیستم نیاز به دو تانک جدا دارد اما نیاز به مبدل حرارتی مکمل با انتقال حرارت از کل سیال انتقال حرارت به واسطه ذخیره ای رفع شده است. سیال در دمای پایین در تانک



شبیه‌سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه  
حرارتی خورشیدی

سرد ذخیره می‌شود، حرارت در میدان کلکتور خورشیدی به سیال داده می‌شود و سیال گرم در دمای بالاتر در تانک گرم نگهداری می‌شود. کلکتور خورشیدی از آینه‌ای سهموی با تمرکز کردن تشعشع مستقیم خورشید به لوله جاذب، که درون آن جریان سیال انتقال حرارت که جاذب حرارت است استفاده می‌شود. برای کنترل دمای خروجی از کنترلر پیشفاز با فیدبک مثبت که برای میزان جریان جرمی جریان 1 (کل جریان ورودی به میدان کلکتور که قابل تغییر دادن است) استفاده شده است. (شکل 1 را مشاهده نمایید). انرژی ذخیره شده در این تانک گرم دریافت شده از طریق پمپ سیال گرم به درون بویلر می‌رود. در این مدل‌سازی، فرض شده است که آب مایع اشباع به سمت بویلر می‌رود و بخار اشباع خارج می‌شود. در این تغییر، سیال گرم به دمای پایین بر می‌گردد و به تانک سرد پمپ می‌شود. خروجی توان از طریق میزان جریان بخار اشباع تولید شده در بویلر بیان می‌شود. این میزان جریان اندازه‌گیری و کنترلر PID آن را کنترل و با استفاده از جریان 2 (جریان که از سیال تانک گرم به تانک سرد می‌رود) که قابلیت تغییر دادن را دارد استفاده می‌شود.



شکل 1- دو تانک سیستم ذخیره انرژی حرارتی به میدان کلکتور سهموی متمرکز خورشیدی مستقیماً اتصال دارند. این سیستم از میزان جریان شماره 1 با کنترل دمای خروجی سیال از میدان کلکتور و میزان جریان شماره 2 با کنترل میزان جریان از بویلر استفاده می‌کند.

## کنترل

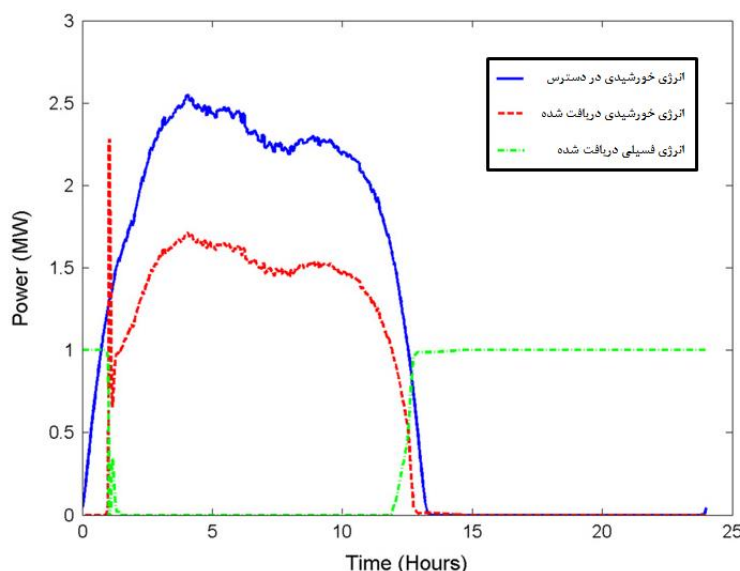
به دلیل ضربه اختلالات بزرگ کارکرد سیستم، کنترل اتوماتیک برای کارکرد واحد ضروری است. دمای میدان کلکتور از طریق طرح کنترلر فیدبک PID مثبت پیش‌فاز کنترل می‌شود. طرح کنترلر پیش‌فاز برای اندازه‌گیری پرتو عمود مستقیم با پیش‌بینی تغییرات در دمای خروج میدان استفاده می‌شود. کنترلر PID با فیدبک همچنین انحراف جریان پایدار را کاهش داده و محاسبه اختلالات اضافی را انجام می‌دهد. (مثل دمای محیط، سرعت باد و غیره). برای یک سیستم با ذخیره انرژی حرارتی، خروجی توان با استفاده از کنترلر PID کنترل شده است که بعد از آغاز شارژ تانک ذخیره گرم، فعال می‌شود. برای یک سیستم بدون ذخیره انرژی حرارتی، کنترل توان وجود نداشته و به منظور حفظ و نگهداری تجهیزات و استفاده مناسب از آنها و به دلیل ایمنی، یک میزان جریان مینیمم به درون میدان کلکتور خورشیدی ارسال می‌شود و سیستم در استراحت خواهد ماند.



## نتایج

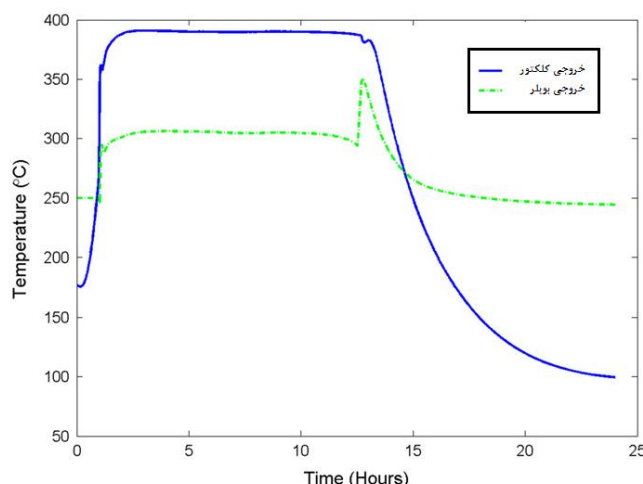
### 1- روز صاف: سیستم بدون ذخیره

در این مقاله یک نیروگاه تولید بخار سهموی خطی با تولید 1mw با مساحت 300 m<sup>2</sup> کلکتور خورشیدی است طراحی شده است. [8] سیستم کنترل برای کنترل دمای خروجی کلکتور تا 390° C طراحی شده است. فرض شده که این بویلر در دمای ثابت 250° C (40 بار فشار) کار می کند. فرض شده که یک سیستم کنترل مجزا برای نگه داشتن دما و فشار بویلر استفاده شود. هیچ تانک ذخیره در این راه اندازی وجود ندارد فقط میزان جریان سیال انتقال حرارت قابل تغییر می باشد که از طریق همان میدان خورشیدی می باشد شبیه آنچه که در درون بویلر وجود دارد. نتایج این شبیه سازی ها در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است.



شکل 2 - نمودار کل توان قابل دسترس خورشیدی و توان دریافت شده برای بارگذاری در سیستم کلکتور سهموی خطی بدون ذخیره حرارتی

همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است، کنترلر فیدبک مثبت پیشفاز به خوبی دما را ثابت نگه می دارد. نگه داشتن ثابت دمای خروجی کلکتور به این دلیل است که میزان جریان سیال انتقال حرارت متغیر است، در نتیجه خروجی توان متغیر است که در شکل 2 نشان داده شده است. بدلیل اینکه واحد برای تولید حرارتی 1mw طراحی شده است، یک توان منبع فسیلی بصورت پشتیبان (به طور مثال گاز طبیعی) باید برای هر کم شدن توان محاسبه و استفاده شود.



شکل 3- دمای خروجی کلکتور و دمای خروجی بویلر سیال انتقال حرارت برای یک سیستم بدون ذخیره انرژی حرارتی

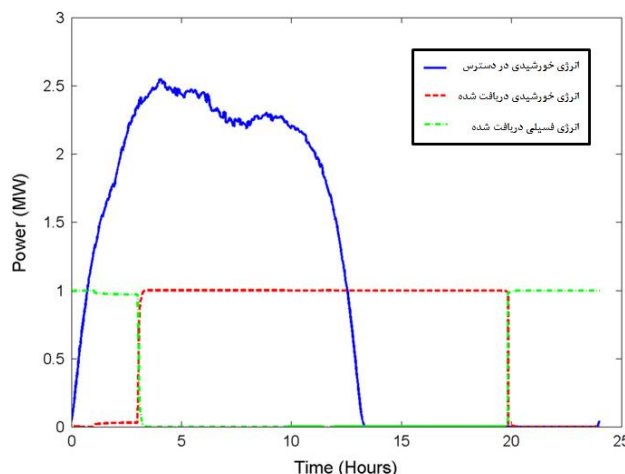
همانطوری که در شکل 2 دیده می شود، توان سوخت فسیلی مکمل زمانی که سهم انرژی خورشیدی کمتر از آستانه 1mw می شود استفاده می شود. برای سیستم cps بدون ذخیره حرارتی، طرح کنترل برای ثابت نگه داشتن خروجی توان طراحی شده است که امکان پذیر نیست، زیرا سیستم فقط می تواند از تابش خورشید در دسترس، توان تولید کند. بدون ذخیره، سیستم توانایی ندارد انرژی بیش از حد جذب کند زمانی که انرژی خورشید در دسترس است در نتیجه زمانی که کمبود پرتو خورشید را داریم انرژی ذخیره شده ای به محض دریافت وجود ندارد.

## 2- روز صاف: سیستم با ذخیره

سیستم بویلر/کلکتور به طور مشابه با سیستم ذخیره انرژی حرارتی در نظر گرفته شده اند. کنترل خروجی توان و دمای خروجی کلکتور ممکن است به صورت مستقل تنظیم شود. طرح کنترل با استفاده میزان سیال انتقال حرارت از میان کلکتور به عنوان متغیری قابل تغییر است که برای نگه داشتن ثابت دمای خروجی با استفاده از کنترلر فیدبک مثبت پیشفاز استفاده می شود. میزان جریان سیال انتقال حرارت از میان بویلر با نگه داشتن خروجی توان (با معادل آن، میزان تولید بخار) به صورت ثابت با استفاده از کنترلر فیدبک استفاده می شود. در شکل 4 نشان دادیم که کنترلر، توان خروجی را در نقطه تنظیم ثابت نگه می دارد، صبح زود در روز صاف با سیستم ذخیره، زمانی که انرژی خورشید بیشتر در دسترس تر از مطالبه بار است، انرژی از طریق گرمای سیال انتقال حرارت بیش از اندازه در تانک ذخیره گرم حاصل می شود. همانطور که در شکل 4 و 5 نشان داده می شود، سیستم به صورت کامل در زمان  $t=11/3h$  شارژ می شود. هرچند که به دلیل انرژی خورشید هنوز بیشتر

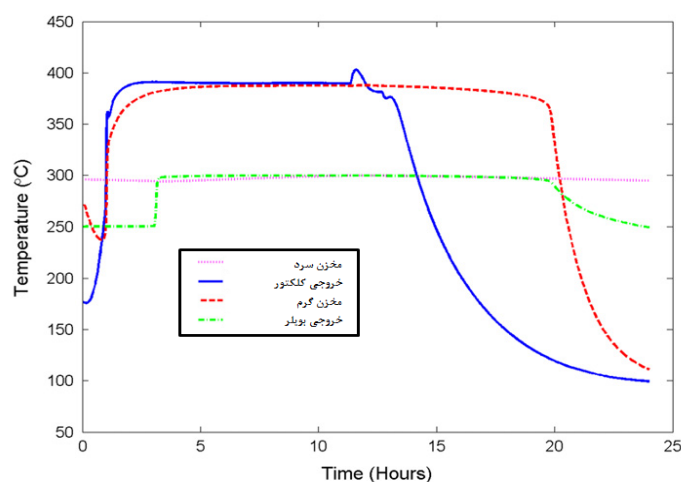


شبیه‌سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه  
حرارتی خورشیدی



شکل 4- کل انرژی خورشیدی قابل دسترس و کل توان دریافت شده برای بارگذاری در سیستم با ذخیره انرژی حرارتی

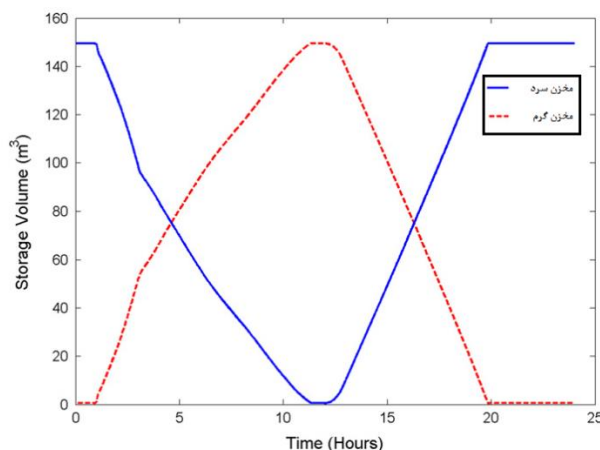
در دسترس است سیستم مجاز به بیشتر شدن شارژ دارد. زمانی که این اتفاق می‌افتد، کنترلر دمای خروجی کلکتور غیر فعال می‌شود. جریان به سمت تانک گرم که برابر خروجی جریان از تانک گرم است می‌رود زیرا تانک پر است. این نتیجه در کاهش میزان جریان درون میدان کلکتور و دمای بالاتر خروج میدان کلکتور اثر دارد. انرژی اضافی، محصول دمای بالاتر در این حالت است. علاوه بر این دمای بیشتر از حالت مجاز می‌تواند دلیل خرابی تجهیزات یا منجر شدن به پایین آمدن دما سیال انتقال حرارت می‌شود زمانی این اتفاق می‌افتد، قسمتی از میدان خورشیدی بایستی خاموش شود تا از رخداد بالاتر رفتن بیش از اندازه دما جلوگیری کند. به طور متناوب، انرژی بیشتر می‌تواند از طریق استفاده تانک‌های بزرگ برای نگه داشتن میزان جریان سیال انتقال حرارت دمای خروجی درون کلکتور کم یا زیاد استفاده شود. هر چند که، علاوه بر این ظرفیت فقط در همچنین روزهایی بهره‌برداری کرد زمانی که شرایط ایده‌آل باشد علاوه بر این ظرفیت ذخیره اضافی ممکن است هزینه موثر نداشته باشد. این سیستم، با تعیین ترکیب بهینه سطح میدان خورشیدی و ظرفیت ذخیره براساس مینیمم هزینه حلقوی واحد سائز آن تعیین شده است.



شکل 5- نمودار دمایی برای سیستم با ذخیره انرژی حرارتی

شبیه سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه حرارتی خورشیدی

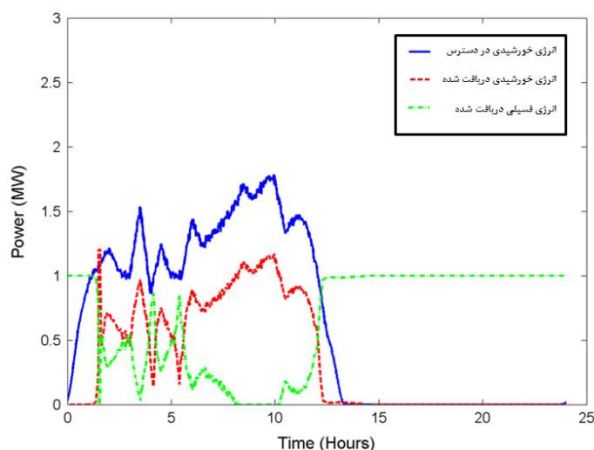
چهارمین کنفرانس بین المللی  
رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی



شکل 6- حجم سیال انتقال حرارت در تانکهای ذخیره حرارتی

### 3- روز ابری: سیستم بدون ذخیره

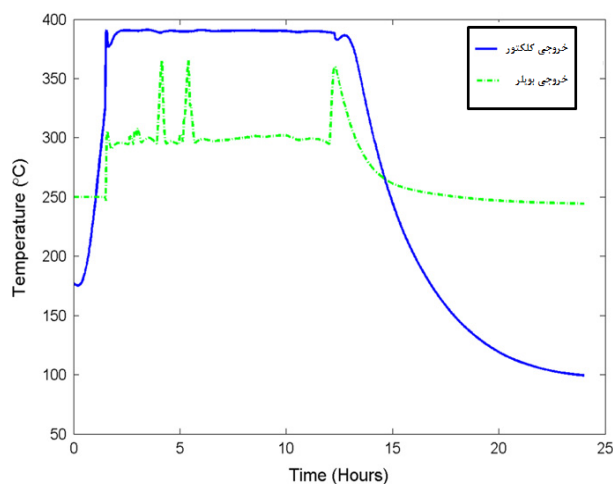
زمانی که یک روز ابری با تغییرات بزرگتر در حالت انرژی خورشیدی در دسترس شبیه سازی شده است، تغییرات نمایشی سیستم در خروجی توان که نتایج در شکل 7 تا 8 نشان داده شده است. همانطور که در شکل 7 نشان دادیم، پوشش ابر متناوب دلیل دریافت توان با توجه به تغییرات پرتو خورشیدی قابل دسترس می باشد. نوسان زیاد در توان خروجی یک بار بزرگ روی سیستم انرژی باقیمانده می گذارد که امکان دارد نیاز به بارهای خاص مقتضی دارد. در این آنالیز فرض شده است که سوخت پشتیبان فسیلی می تواند به سرعت خاموش و روشن شود اما در واقعیت امکان ندارد سیستم توانایی انجام این کار را داشته باشد. برای تولید توان الکتریکی به طور خاص، امکان دارد به صورت شیب دار سریعاً بالا و پایین داشته باشد که راه ایده آلی برای توان تولید یا راه موثری نیست. کنترل دما در این سناریو عالی است همانطور که در شکل 8 نشان داده می شود دمای خروجی سیال بویلر بعضی از اوقات دبی جرمی ناگهان کاهش می یابد که تلاش می شود که دمای خروجی حوزه کلکتور کنترل شود. با وجود کنترل دما، خروجی توان نوسان می یابد.



شکل 7- نمودار کل انرژی خورشیدی موجود و انرژی دریافت شده برای بارگذاری در روز قسمتی ابری برای سیستم بدون ذخیره



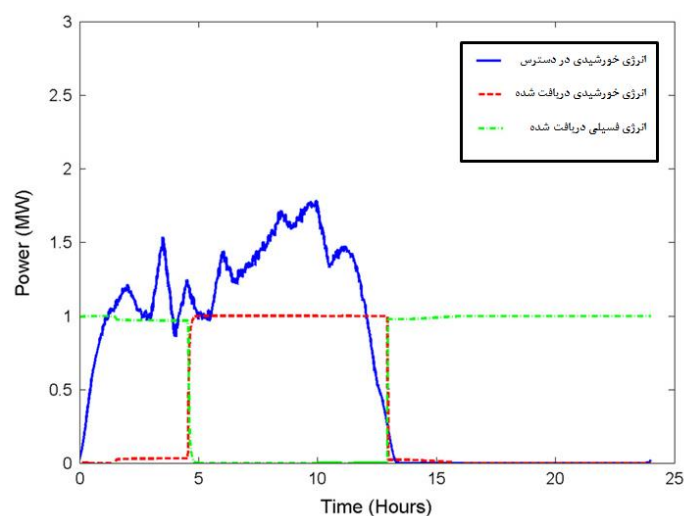
شبیه‌سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه  
حرارتی خورشیدی



شکل 8- دمای خروجی سیال انتقال حرارت از کلکتور و بویلر برای سیستم بدون ذخیره حرارتی

#### 4- روز ابری: سیستم با ذخیره

ارزش ذخیره انرژی حرارتی برای کنترل خروجی توان یک سیستم خورشیدی متمرکز بهترین حالت است در روزهای ابری (شکل های 9 تا 11) در برابر روشنایی سیستم بدون ذخیره، و سیستم با ذخیره خروجی توان را ثابت نگه می‌دارد، با وجود این حقیقت از توان خورشیدی پیوسته قابل دسترس نیست. در همین حال مهم است که دمای خروجی کلکتور را کنترل کنیم با بالا نگه داشتن کافی دما برای دریافت حرارت با بار و کافی با جلوگیری از کاهش دمای سیال، کنترل های دمای خروجی در مقدار ثابت ضروری نیست. خروجی توان هنوز می‌تواند به خوبی علی‌رغم نوسان دما کنترل شود. زیرا محتویات تانک ذخیره گرم یک ذخیره انرژی است، سیستم کنترل بویلر می‌تواند به محض دریافت، خروجی توان را ثابت نگه دارد.

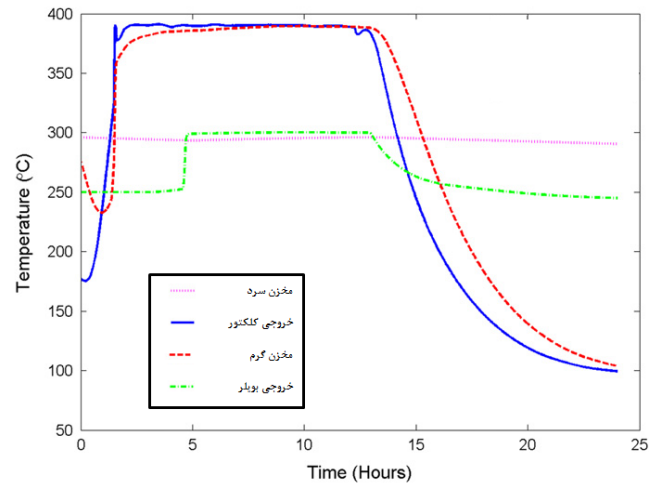


شکل 9- توان موجود و دریافتی برای یک سیستم با ذخیره حرارتی در روز قسمتی ابری

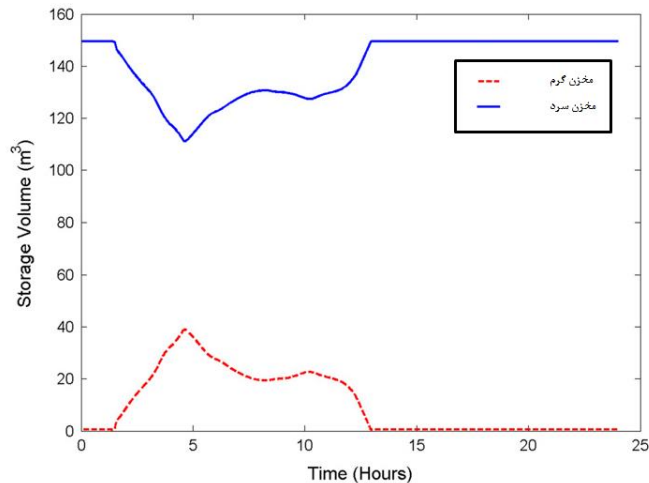




شبیه سازی و بررسی تاثیر ذخیره انرژی حرارتی بر کارکرد یک نیروگاه  
حرارتی خورشیدی



شکل 10- دماها برای سیستم با ذخیره در روز قسمتی ابری



شکل 11- حجم سیال انتقال حرارت در تانک های ذخیره برای روز قسمتی ابری

به دلیل انرژی کل کمتری در روزهای ابری در دسترس است، بیش از اندازه شارژ سیستم TES در این حالت رخ نمی دهد. دمای تانک ذخیره گرم، علاوه بر این ثابت ماندن تنظیم دمای خروجی کلکتور  $390^{\circ}C$  باقی می ماند.

### نتیجه

خلاصه هر سناریویی که در بالا مشاهده شد در جدول 1 آورده شده است. نتایج این شبیه سازی نشان می دهد که از طریق افزایش 8 ساعت ظرفیت ذخیره، سهم خورشید (کسر انرژی تامین شده توسط خورشید) از نیروگاه می تواند بیشتر از 47% تا بالای 70 درصد در روز ابری افزایش یابد.



جدول 1- خلاصه هر سناریو شبهه سازی که نشان دهنده سوخت تکمیلی مورد نیاز و سهم خورشیدی

	روز صاف بدون سیستم ذخیره	روز ابری بدون سیستم ذخیره	روز صاف با سیستم ذخیره	روز صاف بدون سیستم ذخیره
انرژی دریافتی برای بارگذاری	16.48	16.82	8.40	8.49
سوخت تکمیلی مورد نیاز (mwh)	12.58	7.18	15.78	15.51
سهم خورشیدی (%)	47.6	70.1	34.3	35.4

هر چند که، در طول روزهای ابری، مزیت اصلی ذخیره انرژی حرارتی توانایی نگهداری خروجی توان ثابت از طریق استفاده کردن از تانک ذخیره به عنوان یک حائل میان انرژی قابل دسترس و انرژی درخواستی می باشد. طرح کنترل ساده برای این هدف انجام شده است. هر چند که بیشتر کنترل پیشرفته و طرح بهینه می تواند به منظور یک اهرم کامل برای طرح ذخیره دنبال شود. طرح کنترل بهینه می تواند هزینه کارکرد را مینیمم کند. همچنین ذخیره انرژی حرارتی به این سیستم ها اجازه می دهد بر تعداد زیادی از مسائل وابسته به توان خورشیدی غلبه کنند.

#### منابع

- 1- Dincer, I., Rosen, M., 2002. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. West Sussex, England.
- 2- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lazaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L., 2010. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 — concepts, materials, and modellization. Renewable Sustainable Energy Rev. 14, 31–55.
- 3- Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Perez, M., 2010. Parabolic-trough solar collectors and their applications. Renewable Sustainable Energy Rev. 14, 1695–1721.
- 4- Stuetzle, T., Blair, N., Mitchell, J., Beckman, W., 2004. Automatic control of a 30 MWe SEGS VI parabolic trough plant. Solar Energy 76, 187–193.
- 5- Medrano, M., Gil, A., Martorell, I., Potau, X., Cabeza, L., 2010. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—case studies. Renewable Sustainable Energy Rev. 14, 56–72.
- 6- Camacho, E., Rubio, F., Berenguel, M., Valenzuela, L., 2007. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. Part II: advanced control approaches. Sol. Energy 81, 1252–1272.
- 7- Silva, R., Rato, L., Lemos, J., Coito, F., 1996. Cascade control of a distributed collector solar field. J. Process Control 7, 111–117.
- 8- Kody M. Powell, Thomas F. Edgar. 2011. Modeling and control of a solar thermal power plant with thermal energy storage. Chemical Engineering Science 71 (2012) 138–145.