

مدل سازی و بهینه سازی نیروگاه دودکش خورشیدی با الگوریتم های SA و PSO

سید حسین فلاح^۱ و محمدصادق ولی پور^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۶	در این مقاله، یک مدل ریاضی برای موازنه‌ی انرژی و تولید توان در یک نیروگاه دودکش خورشیدی توسعه داده شده است. با استفاده از این مدل، میزان توان تولیدی یک نیروگاه دودکش خورشیدی، بررسی شده است. ابتدا معادلات حاکم بر نیروگاه نوشته شده، سپس مجموعه معادلات و روابط کمکی مرتبط، با استفاده از الگوریتم‌های تبرید شبیه‌سازی شده و بهینه‌سازی ازدحام ذرات حل می‌گردد. برای بررسی صحت و دقت مدل از داده‌های موجود در مقاله‌ی مرجع استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، مقدار راندمان حرارتی در نیروگاه دودکش خورشیدی، عددی کوچک و نسبت توان تولیدی به کل انرژی ورودی برای داده‌های مرجع تقریباً برابر ۰/۶ درصد می‌باشد. بیشترین انتقال حرارت در نیروگاه بین دو سطح زمین و سقف آن رخ می‌دهد. با تغییر در ابعاد هندسی نیروگاه، توان تغییرات قابل توجهی دارد. با توجه به موازنه‌ی انرژی، افزایش حرارت ورودی باعث بالا رفتن دمای سطوح نیروگاه می‌گردد، که این امر اتلاف انرژی را در پی دارد. در روش حل با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با افزایش تعداد تکرار در الگوریتم، دقت نتایج نیز بهبود می‌یابد.
واژگان کلیدی: نیروگاه دودکش خورشیدی، مدل سازی ریاضی، موازنه‌ی انرژی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات.	

۱-مقدمه

استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشید، می‌تواند راه‌کاری برای کمک به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی باشد. نیروگاه دودکش خورشیدی نمونه‌ای از فناوری‌های انرژی خورشیدی می‌باشد که می‌تواند تشعشع مستقیم و پراکنده‌ی خورشید را جذب و بخشی از این انرژی را با اثر گلخانه‌ای به توان الکتریکی تبدیل کند. نیروگاه دودکش خورشیدی از سه بخش اصلی کلکتور، دودکش و توربین، تشکیل می‌شود. هوا در اثر گرم شدن و با جابه‌جایی طبیعی در نیروگاه به حرکت در می‌آید و به سمت مرکز کلکتور حرکت می‌کند. شکل (۱)، طرحواره‌ای از نیروگاه دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد.

مطالعات متفاوتی در زمینه‌ی نیروگاه دودکش خورشیدی انجام گرفته‌است. گوو و همکاران [۱-۳] تحلیل ترمودینامیکی و تحلیل عددی را با نرم‌افزار ANSYS Fluent برای نسبت فشار بهینه‌ی توربین (نسبت اختلاف فشار قبل و بعد توربین به اختلاف فشار کل) مورد بررسی قرار دادند، براساس این بررسی‌ها، نسبت فشار بهینه‌ی توربین برای داده‌های مانزائارس ۰/۹ گزارش شده است، اتلاف آیرودینامیک لحاظ شده در شبیه‌سازی عددی، بر نسبت فشار بهینه‌ی توربین مؤثر است، با تغییر در شکل کلکتور بر نسبت فشار بهینه‌ی توربین تغییر محسوس رخ نمی‌دهد و وجود لایه‌ی ذخیره‌ی انرژی کاملاً بر توان نیروگاه تأثیرگذار است.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: msvalipour@semnan.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد سیستم‌های انرژی، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان
۲. دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

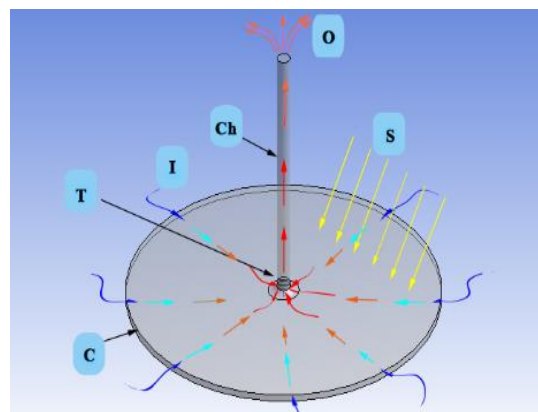
دودکش خورشیدی با یک مدل تحلیلی پرداختند. نسیری-وطن و همکاران [۱۰] تأثیر گردباد^۴ بر نیروگاه دودکش خورشیدی را با مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که گردباد باعث افزایش ضریب جابجایی در کلکتور می‌گردد.

کیرستین و بکسترم [۱۱] تحلیل عددی را برای جریان در بخش گذر از کلکتور به دودکش با دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار ANSYS-CFX انجام دادند. کنسریسوک و چیتسمبون [۱۲]، شبیه‌سازی دینامیکی را برای نیروگاه دودکش خورشیدی انجام دادند و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX و دینامیک سیالات محاسباتی، متغیرهای بدون بعد را تحلیل کردند. در تحلیل، آن‌ها از روش آنالیز ابعادی و پی‌باکینگ هم استفاده گردید. فلوری و ون بکستروم [۱۳ و ۱۴] عملکرد دودکش خورشیدی را با آرایش‌های متفاوت توربین مورد بررسی قرار دادند.

کنسریسوک و چیتسمبون [۱۵] تأثیر تغییر مساحت جریان را در نیروگاه دودکش خورشیدی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این بررسی، از روش مقداردهی محدود و نرم‌افزار ANSYS-CFX استفاده کردند و دودکش همگرا، دودکش واگرا و دودکش با مقطع ثابت را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دودکش واگرا نسبت به دودکش با مقطع ثابت عملکرد بهتری دارد.

مینگ و همکاران [۱۶-۱۸] تحلیل عددی را برای تأثیر باد متقاطع، جریان هوا و مشخصات انتقال حرارت در نیروگاه دودکش خورشیدی با سیستم (لایه) ذخیره‌ی انرژی انجام دادند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها به ترتیب نشان می‌دهد که باد متقاطع محیط بر عملکرد دودکش خورشیدی تأثیر گذار می‌باشد، به طوری که اگر ضعیف یا زیاد قوی باشد، میدان جریان را تخریب می‌کند و توان خروجی را کاهش می‌دهد، ذخیره‌ی حرارت در تشعشع‌های بالا افزایش می‌یابد و با افزایش تشعشع اتلاف انرژی در لایه ذخیره‌ی انرژی نیز بیشتر می‌شود.

جو و همکاران [۱۹] ماکزیمم ارتفاع و ارتفاع بهینه‌ی دودکش را برای نیروگاه دودکش خورشیدی مورد بررسی قرار دادند. لی و همکاران [۲۰] تأثیر شعاع کلکتور و ارتفاع دودکش را بر توان خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی مورد بررسی و نتایج تحلیل را با نتایج نیروگاه مانزانارس



شکل ۱- شماتیک کلی از نیروگاه دودکش خورشیدی
 C: کلکتور، Ch: دودکش، I: هوای ورودی، O: هوای گرم، S: تشعشع خورشید، T: توربین خروجی

شکل ۱- شماتیک کلی از نیروگاه دودکش خورشیدی

پاتل و همکاران [۴] تأثیر پارامترهای هندسی نیروگاه را بر عملکرد نیروگاه، مورد بررسی قرار دادند و در این بررسی از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ و نرم‌افزار ANSYS-CFX استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که توان نیروگاه دودکش خورشیدی (SCPP)^۲، به ابعاد هندسی نیروگاه، وابسته است و برای توان ماکزیمم ابعاد بهینه وجود دارد.

دجیمیلی و چاکر [۵] با نرم‌افزار ANSYS Fluent امکان پذیر بودن ساخت نیروگاه دودکش خورشیدی را در منطقه-ای^۳ از الجزایر بررسی کردند و تأثیر دمای محیط بر عملکرد نیروگاه را نیز مورد بررسی قرار دادند. کتام و همکاران [۶] تأثیر پروفیل کلکتور در محل اتصال به دودکش را در نیروگاه دودکش خورشیدی، مورد بررسی قرار دادند. اسنقی و لاجوردی [۷] عملکرد دودکش خورشیدی را در ایران، مورد بررسی قرار دادند و از نرم‌افزار فلوئنت برای تحلیل استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که ناحیه‌ی مرکزی و جنوبی ایران به دلیل شدت تشعشع مناسب و ساعات آفتابی بیشتر، برای تولید توان با نیروگاه دودکش خورشیدی، مناسب می‌باشند.

مایا و همکاران [۸] تحلیل انرژی و اکسرژی را برای جریان داخل نیروگاه دودکش خورشیدی انجام دادند و از قانون اول و دوم ترمودینامیک استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که اتلاف اکسرژی با تشعشع، رابطه‌ی مستقیم دارد. رشید و همکاران [۹] به طراحی نیروگاه

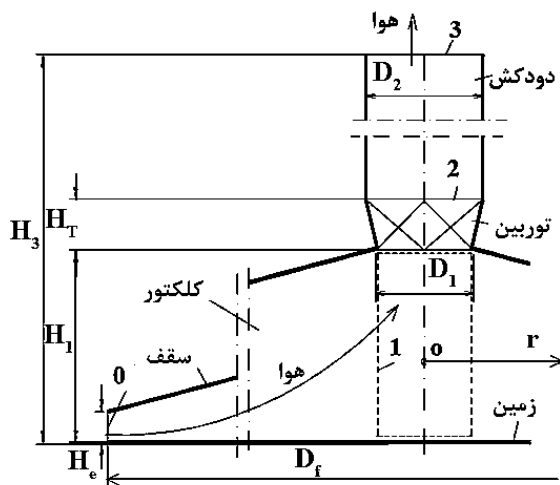
³ M'sila

⁴ Corona Wind

¹ Computational Fluid Dynamics

² Solar Chimney Power Plant

جواب‌ها، زمان محاسبات کمتر شده و به جواب مناسبی نیز خواهیم رسید.



شکل ۲- برش طولی از نیروگاه دودکش خورشیدی مورد مطالعه [۲۳]

۳- الگوریتم‌های SA و PSO

تعداد زیادی از مسائل طبیعت ترکیباتی^۳ را پیش روی ما قرار می‌دهند. مسیر کامیون‌های حمل و نقل باید تعیین شود، انبارها یا نقاط فروش محصولات باید جایابی شوند، شبکه‌های ارتباطی باید طراحی شوند، کانتینرها باید بارگیری شوند؛ از این دست مسائل بی‌شمارند. این مسائل در اندازه‌های کاربردی و عملی خود به قدری بزرگ هستند که نمی‌توان جواب بهینه آن‌ها را در مدت زمان قابل پذیرش و کوتاه به دست آورد. با این وجود، این مسائل باید حل شوند و بنابراین چاره‌ای نیست که به جواب‌های زیر بهینه^۴ بسنده نمود به گونه‌ای که دارای کیفیت قابل پذیرش بوده و در مدت زمان قابل پذیرش به دست آیند.

الگوریتم‌های بسیاری برای طراحی جواب‌های با کیفیت تحت محدودیت زمانی قابل پذیرش، پیشنهاد شده‌است. برای بهبود این الگوریتم‌ها، رویکردهایی آغاز گردید. این رویکردها شامل الگوریتم‌هایی است که به صورت صریحاً یا ضمنی تقابل بین، ایجاد تنوع جستجو (وقتی علائمی وجود دارد که جستجو به سمت مناطق بد فضای جستجو می‌رود) و تشدید جستجو (با این هدف که بهترین جواب در منطقه مورد بررسی را پیدا کند) را مدیریت می‌کنند. این الگوریتم‌ها فراابتکاری نامیده می‌شوند. الگوریتم‌های SA و

مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها برای حل مدل تئوری از نرم‌افزار متلب استفاده کردند.

ون بکستروم و گانون [۲۱]، جریان در توربین، ضریب بار، درجه‌ی عکس‌العمل توربین و راندمان توربین را مورد بررسی قرار دادند. تاکر و همکاران [۲۲] مدل ریاضی را برای نرخ کاهش دما در نیروگاه دودکش خورشیدی ارائه دادند. در مطالعه‌های انجام شده استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در روند حل چندان مورد بررسی قرار نگرفته است.

در این مطالعه، مدل‌سازی ساده‌ای برای نیروگاه دودکش خورشیدی انجام می‌گیرد. کاهش زمان محاسباتی در حل عددی، یک مزیت محسوب می‌گردد. به همین خاطر استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به منظور کاهش زمان محاسباتی، از اهمیت خاصی برخوردار هستند. با توجه به مدل‌سازی ریاضی، از الگوریتم‌های تیرید شبیه‌سازی شده (SA)^۱ و بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۲ به عنوان روش جدیدی برای رسیدن به جواب، استفاده می‌شود و دماهای سطوح مختلف نیروگاه دودکش خورشیدی و پارامترهای دیگر بررسی می‌شوند.

۲- تعریف مسئله

در نیروگاه دودکش خورشیدی، هوای درون کلکتور توسط اثر گلخانه‌ای (عبور طول موج کوتاه از تشعشع خورشید به داخل کلکتور و خارج نشدن طول موج بلند آن) ناشی از تابش خورشید، گرم می‌شود و این هوای گرم به سمت دودکش که در مرکز کلکتور قرار دارد، حرکت می‌کند و توربین را که در پایه‌ی دودکش قرار دارد، به حرکت در می‌آورد. در شکل ۲ مشخصات هندسی و پارامترهای مربوط به نیروگاه دودکش خورشیدی که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد، نشان داده می‌شود.

بر اساس پارامترهای نشان داده شده در شکل (۲)، مدل ریاضی برای نیروگاه دودکش خورشیدی، ایجاد می‌شود و معادلات و روابط مربوط بین اجزای نیروگاه بیان می‌گردد. برای رسیدن به نتایج، زمان محاسبات پارامتری مهم می‌باشد. حل معادلات در محدوده‌ی جواب‌ها زمان‌بر است، در نتیجه با بهینه‌سازی معادلات، توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند الگوریتم‌های SA و PSO، در محدوده‌ی

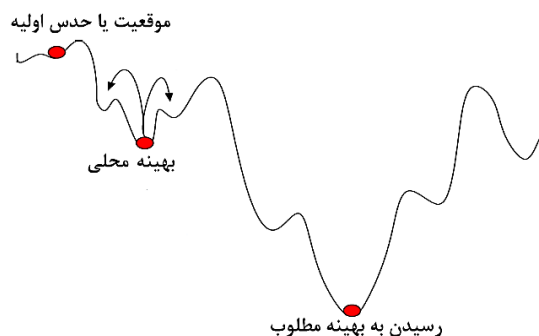
³ Combinatorial

⁴ Sub optimal

¹ Simulated Annealing

² Particle Swarm Optimization

براساس شکل (۲)، هوا در نقطه‌ی 0 وارد کلکتور با ارتفاع ورودی H_e می‌شود.



شکل ۳- روند حل توسط الگوریتم SA

راستای شعاعی به سمت مرکز کلکتور تقریباً ثابت باشد. در نتیجه با توجه به شکل ۲، برای سطح‌هایی که جریان هوا از آن عبور می‌کند، روابط زیر برقرار می‌باشد.

$$\pi \times D_f \times H_e = \pi \times D_1 \times H_1 = \pi \times \frac{D_1^2}{4} \quad (1)$$

$$D_1 = (4 \times D_f \times H_e)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$H_1 = \frac{D_1}{4} \quad (3)$$

در روابط بالا، H_e ، H_1 ، D_f و D_1 به ترتیب، ارتفاع ورودی کلکتور، ارتفاع خروجی کلکتور، قطر کلکتور و قطر ورودی توربین می‌باشد. هوای گرم شده‌ی نقطه‌ی 1 وارد توربین می‌شود و منبسط می‌گردد. D_1 و D_2 به ترتیب قطر ورودی و قطر خروجی توربین می‌باشند. در نقطه‌ی 2 هوای منبسط شده از توربین خارج می‌شود و در نقطه‌ی 3 از دودکش خارج می‌گردد. H_T ارتفاع توربین و H_3 ارتفاع دودکش می‌باشد و براساس شکل (۲)، داریم:

$$H_2 = H_1 + H_T \quad (4)$$

مطالعه بر روی نیروگاه دودکش خورشیدی می‌تواند شامل مطالعه‌ی ترمودینامیکی و مطالعه‌ی انتقال حرارت باشد. که مطالعه‌ی ترمودینامیکی نیز می‌تواند به دو بخش تحلیل انرژی و تحلیل اکسرژی تقسیم گردد.

در تحلیل انرژی وضعیت توزیع دما در سطوح (سقف، کف، دودکش) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در تحلیل اکسرژی عدم توازن انرژی و برگشت ناپذیری فرآیند مطرح می‌گردد و کمی از تحلیل انرژی پیچیده‌تر می‌باشد. در این تحلیل‌ها ویسکوزیته، ضریب جابجایی، گرمای ویژه و بقای انرژی و پارامترهایی دیگر نقش دارند. تحلیل ترمودینامیکی به

PSO نمونه‌هایی از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشند. الگوریتم SA، یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ساده و اثربخش در حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد.

در روش SA، هر نقطه‌ی S ، در فضای جستجو مشابه یک حالت از یک سیستم فیزیکی است و تابع $(E(S))$ که باید کمینه شود، مشابه با انرژی داخلی سیستم در آن حالت است. در این روش، هدف انتقال سیستم از حالت اولیه دلخواه، به حالتی است که سیستم در آن کمترین انرژی را داشته باشد. این روش، طی فرایند تبرید، یک ماده تا دمایی بیشتر از دمای ذوبش گرم می‌شود و سپس به تدریج، دمای آن پایین آورده می‌شود. نحوه کاهش دما بسیار کند و در حدی است که ماده، در تعادل ترمودینامیکی است. به عبارت دیگر، دمای جسم آن قدر ثابت می‌ماند که بهترین ساختار بلوری با کمترین انرژی در آن دما تشکیل شود. اجسامی که ساختار بلوری‌شان در انرژی‌های بالاتری شکل گرفته باشد، شکننده‌تر نیز هستند. اما برعکس، اگر ساختار بلوری جسمی، در انرژی‌های کم‌تر تشکیل شده باشد، از مقاومت فیزیکی بسیار بیشتری برخوردار خواهد بود [۲۴]. الگوریتم PSO یک روش کمینه‌سازی جهانی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. در چنین فضایی، فرضیاتی مطرح می‌شود و یک سرعت ابتدایی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود، همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود. سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌کنند و نتایج حاصله بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه‌ی زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند [۲۵].

در حالت کلی این الگوریتم‌ها، ابتدا، جواب اولیه برای بهینه‌سازی، در نظر گرفته می‌شود، سپس بهینه بودن جواب مورد بررسی قرار می‌گیرد و با قبول کردن برخی از جواب‌های نادرست، دامنه بیشتری از جواب‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و باعث می‌گردد که الگوریتم دچار اشتباه نشود و جواب بهتری را ارائه کند. این موضوع در شکل (۳)، نشان داده شده است.

۴- مدل ریاضی

ابعاد مدل نیروگاه دودکش خورشیدی در محدوده‌ی ابعاد نیروگاه مانزانارس اسپانیا می‌باشد.

- اصطکاک برای جریان هوا در نیروگاه وجود ندارد. افت فشار نسبی توربین (r_T) ۰/۶۶۶۶ در نظر گرفته می شود [۲۷].

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} = r_T = \frac{2}{3} \quad (۶)$$

- فشار و چگالی هوا در نقطه‌ی ۳ با استفاده از تقریب پتلا [۲۸] با روابط زیر بدست می آید.

$$g_3 = g_0 - 3.086 \times 10^{-6} \times H_3 \quad (۷)$$

$$\rho_3 = \rho_0 - 9.973 \times 10^{-5} \times H_3 \quad (۸)$$

$$p_3 = p_0 - \left(\frac{g_0 + g_3}{2} \times \frac{\rho_0 - \rho_3}{2} \times H_3 \right) \quad (۹)$$

در روابط بالا، g [m/s^2]، شتاب گرانش و g_0 شتاب گرانش در سطح زمین می باشد.

- رابطه‌ی بقای مومنتم برای جریان هوا در کلکتور به صورت زیر تعریف می شود [۲۳].

$$p_0 - p_1 = \rho_1 \times w_1^2 \quad (۱۰)$$

در رابطه‌ی بالا، w_1 ، سرعت هوا در نقطه‌ی ۱، می باشد.

- دما برای آسمان صاف (T_{sky})، اختلاف دما و اختلاف فشار بین نقطه‌ی ۰ و ۱ به صورت زیر بیان می گردد.

- شرایط مرجع ($T_0 = 288/14$ [K]) و $[kPa]$ $p_0 = 101/235$ می باشد [۲۹].

$$T_{sky} = 0.0552 \times T_0^{1.5} \quad (۱۱)$$

برای اختلاف فشار و اختلاف دما بین نقطه‌ی ۰ و ۱ نیز داریم [۲۹]:

$$\Delta p = \frac{m \times ((\tau \times S) - (U \times \Delta T))}{2 \times \pi \times H_e^2 \times \rho_0 \times c_p \times T_0} \times \ln \frac{D_f}{D_1} - \frac{m^2}{2 \times \rho_0} \times \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_0^2} \right) \quad (۱۲)$$

U ، c_p ، S و m ، به ترتیب ضریب افت کلکتور، ظرفیت گرمایی، تشعشع خورشید و دبی هوا، می باشند [۲۹].

$$\Delta T = \frac{\tau \times S}{\frac{m \times c_p}{A_f} + U} \quad (۱۳)$$

۴-۲- تحلیل انرژی

برمبنای معادله‌ی بقای انرژی می توان شش رابطه برای سطح کف زمین، هوا در کلکتور، کلکتور (سقف، کف و هوا)، توربین، دودکش و سطح دودکش را به صورت زیر بیان کرد.

صورت کامل کار دشواری می باشد و برای این تحلیل از مدل های ریاضی ساده شده‌ی نیروگاه استفاده می گردد.

در این مطالعه با استفاده از یک مدل ریاضی، موازنه‌ی انرژی با تغییر در برخی پارامترهای ورودی در نیروگاه دودکش خورشیدی، بررسی می گردد.

۴-۱- فرض های اصلی برای مدل ریاضی

با توجه به شکل (۲)، برای فرض های اصلی داریم:

- کف (سطح زمین زیر کلکتور) اتلاف حرارتی به زمین ندارد و به طور کامل ایزوله بوده و کاملاً جسم سیاه در نظر گرفته می شود ($\epsilon_f = 1$) [۲۳].

- دما در کل کف ثابت می باشد.

- سقف کاملاً شفاف است ($\tau_a = 0/95$). ۵٪ از تشعشع خورشید توسط سقف بازتاب می شود و تشعشع هایی که از کف ساطع می شود را از خود عبور نمی دهد. همچنین ضخامت سقف باریک فرض شده و در نتیجه انتقال حرارت رسانشی در آن ناچیز است.

- به جای تغییر دمای سطوح در جهت شعاعی که توسط پاستور در سال ۲۰۰۴ تحلیل شده بود، از دمای مؤثر (T_E) در روابط انتقال حرارت استفاده می شود و داریم [۲۶]:

$$A \times (h_{average} \times T_E + \sigma \times T_E^4) = \int h_{local} \times T \times dA + \sigma \times \int T^4 \times dA \quad (۵)$$

h_{local} ضریب انتقال حرارت جابه جایی محلی، $h_{average}$ ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط، A مساحت جریان، σ ثابت تشعشع بولتزمن و T دمای سطح می باشد. وقتی دمای سطح در محدوده‌ی بزرگی تغییر نکند، می توان از دمای مؤثر استفاده کرد.

- دودکش نیز جسم سیاه می باشد و دیواره‌ی دودکش باریک در نظر گرفته می شود و در نتیجه گرادبان دمایی برای ضخامت دودکش وجود ندارد و دمای درون و بیرون دودکش در طول ارتفاع دودکش ثابت می باشد.

- توزیع دمای هوا با توجه به دمای مؤثر تعریف می شود.

- هوا گاز ایده آل در نظر گرفته می شود ($p = \rho RT$).

که p ، R و T به ترتیب، فشار، چگالی، ثابت گاز و دما می باشد.

- گرمای ویژه‌ی هوا نیز ثابت می باشد.

- هوا تقریباً برای تشعشع شفاف است.

انرژی مبادله شده با تشعشع بین کف و سقف:

$$E_{f-d} = A_d \times \sigma \times (T_{fE}^4 - T_{dE}^4) \quad (26)$$

T_{fE} دمای مؤثر کف و $A_d = \pi(D_f^2 - D_1^2)/4$ می‌باشد.

جدول ۱- زیرنویس انرژی (E) در معادلات

S-f	تشعشع خورشید که به کف می‌رسد.
f-a	حرارت جابه‌جایی بین کف و هوا
f-d	انرژی مبادله شده با تشعشع بین کف و سقف
d-a	حرارت جابه‌جایی بین سقف و هوا
d-sky	انرژی مبادله شده با تشعشع بین سقف و محیط
d-0	حرارت جابه‌جایی بین سقف و محیط
d-ch	انرژی مبادله شده با تشعشع بین سقف و دودکش
Ch-0	حرارت جابه‌جایی بین دودکش و محیط
Ch-sky	انرژی مبادله شده با تشعشع بین دودکش و محیط
Ch-gr	انرژی مبادله شده با تشعشع بین دودکش و زمین
a-ch	انتقال حرارت از سطح دودکش به هوای دودکش
1a,2a,3a	آنتالپی هوا در نقاط 1,2,3
w1,w2,w3	انرژی جنبشی به دلیل سرعت جریان هوا در نقاط 1,2,3
p1,p2,p3	انرژی پتانسیل در نقاط 1,2,3
P	توان توربین

جدول ۲- پارامترهای ثابت a, b, d و e, در رابطه‌ی [۲۳] ۲۲

d	Kg/m ³	-۹/۹۷۳×۱۰
b	s ⁻¹	-۳/۰۸۶×۱۰
e	Kg/m ³	۱/۲۱۷
a	m/s ²	۹/۷۸۰۷

رابطه‌های انتقال حرارت جابه‌جایی:

- بین کف و هوا:

$$E_{f-a} = A_d \times h_{f-a} \times (T_{fE} - T_{aE}) \quad (27)$$

- بین سقف و هوا:

$$E_{d-a} = A_d \times h_{d-a} \times (T_{dE} - T_{aE}) \quad (28)$$

- بین سقف و محیط:

$$E_{d-0} = A_d \times h_{d-0} \times (T_{dE} - T_0) \quad (29)$$

- بین دودکش و محیط:

$$E_{ch-0} = A_{ch} \times h_{ch-0} \times (T_{ch} - T_0) \quad (30)$$

$$E_{a-ch} = \pi \times D_2 \times (H_3 - H_2) \times h_{a-ch} \times \left(\frac{T_{a2} + T_{a3}}{2} - T_{ch} \right) \quad (31)$$

$$h_{d-a} \text{ و } h_{f-a} \text{ , } h_{a-ch} \text{ و } A_{ch} = \pi c_D D_2 (H_3 - H_2)$$

$$E_{S-f} = E_{f-a} + E_{f-d} \quad (14)$$

$$E_{f-a} + E_{d-a} = E_{a1} + E_{w1} + E_{p1} \quad (15)$$

$$E_{S-f} = E_{a1} + E_{w1} + E_{p1} + E_{d-sky} + E_{d-0} + E_{d-ch} \quad (16)$$

$$E_{a1} + E_{w1} + E_{p1} = E_{a2} + E_{w2} + E_{p2} + E_p \quad (17)$$

$$E_{a2} + E_{w2} + E_{p2} + E_{d-ch} = E_{a3} + E_{w3} + E_{p3} + E_{ch-0} + E_{ch-sky} + E_{ch-gr} \quad (18)$$

$$E_{a-ch} + E_{d-ch} = E_{ch-0} + E_{d-sky} + E_{ch-gr} \quad (19)$$

این روابط براساس تبادل انرژی بین سطح کف زمین، هوا در کلکتور، کلکتور (سقف، کف و هوا)، توربین، دودکش و سطح دودکش نوشته می‌شود.

زیرنویس‌های انرژی در جدول ۱ و روابط محاسباتی در ادامه بیان می‌شود [۲۳].

$$E_w = m \times \frac{w^2}{2} \quad (20)$$

$$E_a = m \times c_p \times (T_a - T_0) \quad (21)$$

انرژی پتانسیل به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۳] و پارامترهای a, b, d و e اعداد ثابتی هستند که در جدول ۲ بیان می‌شوند.

$$E_p = m \times \left\{ \frac{-1}{\rho \times d} \left[\frac{b}{6 \times d} (\rho - e)^3 + \frac{a}{2} (\rho - e)^2 \right] \right\} \quad (22)$$

کل انرژی خورشید که توسط کف دریافت می‌شود:

$$E_{S-f} = \tau_d \times \varepsilon_f \times S \times A_d \quad (23)$$

انرژی مبادله شده با تشعشع بین سقف و دودکش:

$$E_{d-ch} = \varepsilon_d \times \varphi_{d-ch} \times \frac{\pi}{4} \times [D_f^2 - (c_D \times D_2)^2] \times \sigma \times (T_{dE}^4 - T_{ch}^4) \quad (24)$$

T_{dE} دمای مؤثر سقف، c_D ضریب ضخامت دیواره‌ی دودکش و φ_{d-ch} ضریب شکل تشعشع می‌باشد. رابطه‌ی بین φ_{ch-d} و φ_{d-ch} به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۳].

$$\varphi_{d-ch} \times \frac{\pi}{4} \times [D_f^2 - (c_D \times D_2)^2] = \varphi_{ch-d} \times \pi \times c_D \times D_2 \times (H_3 - H_2) \quad (25)$$

همچنین $\varphi_{ch-d} = 0.5 \times ((90 - \beta) \div 90)$ و $\beta = 2 \times H_3 / D_f$ برحسب درجه می‌باشد.

برای حل، با استفاده از الگوریتم‌های SA و PSO، معادلات ۱۴ تا ۱۹ را در نظر می‌گیریم. برای الگوریتم‌ها تابع هدف را بهینه کردن، این معادلات لحاظ می‌کنیم، برای این امر از شاخص‌های اعتبار سنجی، مینیمم مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)^۴ و مینیمم خطا (E)^۵ استفاده نمودیم. یعنی بهینه شدن معادلات برابر است با مینیمم خطایی که هر معادله در تساوی با صفر تولید می‌کند. سپس محدوده‌ی پارامترها در الگوریتم را مطابق جدول ۳، انتخاب می‌کنیم و الگوریتم‌ها با توجه به شکل ۳ و تعداد تکرار، مسئله را حل می‌کنند، یعنی در محدوده‌ی جواب‌ها، تابع بهینه که همان مینیمم RMSE یا E هستند را تولید می‌کنند. از میان جواب‌هایی که در تابع بهینه تولید می‌گردد، یک جواب به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود که لزوماً بهترین جواب ممکن نیست، اما یکی از بهترین جواب‌ها می‌باشد.

جدول ۳- دامنه پارامترها در الگوریتم‌های بهینه‌سازی

پارامتر	واحد	حداقل	حداکثر
EP	kW	100	500
T _{a1}	K	310	340
T _{ch}	K	290	300
T _{dE}	K	310	350
T _{fE}	K	370	400
w ₁	m/s	0.1	2

۶- نتایج و بحث

۶-۱- اعتبارسنجی نتایج

جهت انتخاب معیار اعتبار سنجی مناسب برای الگوریتم‌ها و ایجاد تابع هدف مناسب ما از هر دو روش مینیمم RMSE و E استفاده نمودیم. نتایج حاکی از آن بود که دقت الگوریتم‌ها با استفاده از معیار مینیمم RMSE با توجه به داده‌های موجود در جداول ۴ و ۵ بیشتر است. بنابراین در این مطالعه از معیار RMSE استفاده می‌شود. ارزیابی و اعتبار سنجی بر اساس شکل (۲)، با مقاله‌ی مرجع صورت می‌گیرد که این اعتبار سنجی در جداول ۴ و ۵ آمده است. بر اساس داده‌های جداول ۴ و ۵، خطا کم است و داده‌های بدست آمده در این مطالعه، دقت خوبی را دارا می‌باشند.

با توجه به عدد رینولدز^۱، عدد پرانتل^۲، ویسکوزیته‌ی هوا و ناسلت^۳ بدست می‌آید $h_{d-a} = h_{f-a}$ در نظر گرفته می‌شود.

$$h = \text{Nuk}/D \text{ و } R = wD/\theta$$

$$\text{و } (\text{Nu} = 0.023R^{0.8}Pr^{0.4}wD/\theta)$$

انرژی مبادله شده توسط تشعشع:

- بین سقف و دودکش:

$$E_{d-ch} = \varphi_{d-ch} \times A_d \times \sigma \times (T_{dE}^4 - T_{ch}^4) \quad (32)$$

- بین سقف و آسمان:

$$E_{d-sky} = \varphi_{d-sky} \times A_d \times \sigma \times (T_{dE}^4 - T_{sky}^4) \quad (33)$$

- بین دودکش و آسمان:

$$E_{ch-sky} = \varphi_{ch-sky} \times A_{ch} \times \sigma \times (T_{ch}^4 - T_{sky}^4) \quad (34)$$

- بین دودکش و زمین اطراف آن:

$$E_{ch-gr} = \varphi_{ch-gr} \times A_{ch} \times \sigma \times (T_{ch}^4 - T_{gr}^4) \quad (35)$$

روابط ضریب شکل تشعشع:

$$\varphi_{d-sky} + \varphi_{d-ch} = 1 \quad (36)$$

$$\varphi_{ch-sky} + \varphi_{ch-d} + \varphi_{ch-gr} = 1 \quad (37)$$

φ_{ch-sky} ، ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود و ضرایب شکل دیگر باروابع بدست می‌آیند. برای محاسبه‌ی T_{a2} از رابطه‌ی آیزنروپیک با نمای $k = 1/4$ در توربین استفاده می‌شود و راندمان توربین ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. تغییر دما در کلکتور خطی فرض می‌گردد.

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_{a2}}{T_{a1}} \quad (38)$$

$$T_{aE} = \frac{T_0 + T_{a1}}{2} \quad (39)$$

در رابطه‌ی قبلی T_{aE} دمای مؤثر هوا در کلکتور می‌باشد. همچنین $D_1/D_2 = 0/95$ ، $C_D = 1/0.15$ ، $T_{gr} = T_0$ ، $C_p = 1000$ [j/kg.k]، $H_T = 1$ [m].

$$\text{و } h_{d-0} = 5 \text{ [W/m}^2\text{.k]}, R = 287/0.4 \text{ [j/kg.k]}$$

$$\text{[} 25 \text{]} h_{ch-0} = 7 \text{ [W/m}^2\text{.k]}$$

۵- حل معادلات

⁴ Root Mean Square Error

⁵ Error

¹ Reynolds number

² Prandtl number

³ Nusselt number

۵۰۰۰۰۰ است، در حالی که در تعداد تکرار ۱۰۰۰۰۰۰ نیز دقت الگوریتم PSO مناسب تر می باشد، زیرا در حل معادلات، RSME کوچکتری دارد. جواب های مربوط به الگوریتم ها از جواب های مربوط به مقاله مرجع نیز مناسب تر است زیرا RSME آنها از RMSE مقاله مرجع مناسب تر است. در نتیجه استفاده از این دو الگوریتم در حل این نوع مسائل عددی مناسب می باشد. همچنین با افزایش تعداد تکرار، دقت الگوریتم PSO بهبود می یابد.

جدول ۴- اعتبار سنجی، برای کدهای نوشته شده در این مطالعه با تابع بهینه سازی مینیمم خطا تکرار ۱۰۰۰۰۰۰، با مقاله ی مرجع

پارامتر	واحد	مقادیر مرجع [۲۳]	کد SA	کد PSO
input				
-	-	-	It=100000	
S	W/m ²	800	800	800
H ₃	m	195	195	195
D _f	m	240	240	240
H _e	m	0.3	0.3	0.3
output				
p ₁	Pa	101233.66	101234.18	101234.07
p ₂	Pa	99686.13	99686.19	99686.15
p ₃	Pa	98912	98912.20	98912.20
w ₁	m/s	1.1	0.86	0.918
m	Kg/s	276	213.62	228.73
T _{fE}	k	388.3	388.58	391.11
T _{dE}	k	329.8	331.07	332.32
T _{aE}	k	303.18	304.90	304.10
T _{a1}	k	318.19	321.67	320.06
T _{ch}	k	292.43	292.49	297

جدول ۷- اعتبار سنجی، برای کدهای نوشته شده در این مطالعه با تابع بهینه سازی مینیمم RMSE و تکرار ۱۰۰۰۰۰۰۰، با مقاله ی مرجع

پارامتر	واحد	مقادیر مرجع [۲۵]	کد SA	کد PSO
input				
-	-	-	It=1000000	
S	W/m ²	800	800	800
H ₃	m	195	195	195
D _f	m	240	240	240
H _e	m	0.3	0.3	0.3
output				
T _{fE}	k	388.3	389.59	390.53
T _{dE}	k	329.8	328.79	331.85
T _{a1}	k	318.19	318.77	319.64
T _{ch}	k	292.43	293.58	297
w ₁	m/s	1.1	1.19	0.96
RMSE		0.0552	0.0277	0.0157

براساس جدول ۵، داده ها با معیار خطای RMSE دقت بهتری را نسبت به داده های جدول ۴، با معیار خطای مینیمم، دارا می باشند. همچنین با توجه به مقاله ی مرجع دقت الگوریتم PSO در این تکرار، مناسب تر می باشد. دقت اعتبارسنجی در بخش دماها و فشارهای بدست آمده بهتر از دبی و سرعت بدست آمده می باشد.

جدول ۵- اعتبار سنجی، برای کدهای نوشته شده در این مطالعه با تابع بهینه سازی مینیمم RMSE و تکرار

۱۰۰۰۰۰۰، با مقاله ی مرجع

پارامتر	واحد	مقادیر مرجع [۲۵]	کد SA	کد PSO
input				
-	-	-	It=100000	
S	W/m ²	800	800	800
H ₃	m	195	195	195
D _f	m	240	240	240
H _e	m	0.3	0.3	0.3
output				
p ₁	Pa	101233.66	10233.667	10233.667
p ₂	Pa	99686.13	99724.49	99686.02
p ₃	Pa	98912	98912.2	98912.2
w ₁	m/s	1.1	1.136	1.096
m	Kg/s	276	281.11	274.69
T _{fE}	k	388.3	390.88	388.82
T _{dE}	k	329.8	333.88	330.62
T _{aE}	k	303.18	305.28	303.20
T _{a1}	k	318.19	322.41	318.27
T _{ch}	k	292.43	294.06	297
RMSE		0.0552	0.0373	0.0160

جدول ۶- اعتبار سنجی، برای کدهای نوشته شده در این مطالعه با تابع بهینه سازی مینیمم RMSE و تکرار

۵۰۰۰۰۰۰، با مقاله ی مرجع

پارامتر	واحد	مقادیر مرجع [۲۵]	کد SA	کد PSO
input				
-	-	-	It=500000	
S	W/m ²	800	800	800
H ₃	m	195	195	195
D _f	m	240	240	240
H _e	m	0.3	0.3	0.3
output				
T _{fE}	k	388.3	388.78	389.68
T _{dE}	k	329.8	330.71	331.23
T _{a1}	k	318.19	317.39	318.96
T _{ch}	k	292.43	294.44	297
w ₁	m/s	1.1	1.03	1.027
RMSE		0.0552	0.0309	0.0158

در جدول ۶ و ۷، مقایسه ی جواب ها برای تعداد تکرارهای متفاوت برای دو الگوریتم، بیان می شود. باتوجه به نتایج RMSE، الگوریتم PSO دارای دقت مناسب در تعداد تکرار

کنیم که این امر سبب بهبود در انتقال حرارت از سطوح با دمای بالاتر به هوای داخل کلکتور می‌گردد. از طرفی با افزایش تشعشع نیز بهبود در انتقال حرارت صورت می‌گیرد اما اتلافات حرارتی نیز بیشتر می‌گردد. اتلافات حرارتی شامل مواردی مانند، انتقال حرارت به محیط، انتقال حرارت به دودکش و... می‌باشد.

۶-۲- نتایج مدل

در این قسمت، با توجه با الگوریتم PSO، با تغییر در ابعاد نیروگاه، به بررسی پارامترهایی که در جداول قبل بیان شد، می‌پردازیم. در جدول ۹، روند پاسخ به تغییر در ابعاد هندسی نیروگاه بیان می‌شود.

جدول ۹- داده‌ها برای کد PSO نوشته شده در این مطالعه

برای ابعاد هندسی متفاوت با تابع بهینه سازی مینیمم

RMSE و تکرار ۱۰۰۰۰۰

پارامتر	واحد	کد PSO-1	کد PSO-2	کد PSO-3
input				
S	W/m ²	800	800	800
H ₃	m	205	195	195
D _f	m	240	260	240
H _c	m	0.3	0.3	0.4
output				
p ₁	Pa	101233.98	101233.98	101234.28
p ₂	Pa	99607.38	99686.13	99686.22
p ₃	Pa	98794.09	98912.20	98912.20
w ₁	m/s	0.96	0.96	0.80
m	Kg/s	239.77	259.44	271.28
T _{FE}	k	390.54	390.55	392.41
T _{DE}	k	331.89	331.90	333.18
T _{AE}	k	303.90	303.91	300.82
T _{AI}	k	319.67	319.68	313.50
T _{ch}	k	297	297	297
EP	kW	209.02	208.69	227.70

براساس جدول ۹، با افزایش ابعاد هندسی توان نیز افزایش و دمای سطوح تغییرات کمی را از خود نشان می‌دهد. دلیل این افت دما در سطوح، افزایش دبی می‌باشد. با بیشتر شدن ابعاد نیروگاه، دبی بیشتری به نیروگاه وارد می‌شود، دبی بیشتر حرارت بیشتری را به خود جذب کرده و باعث می‌گردد که حرارت کمتری بر سطوح تأثیرگذار باشد.

در شکل (۴)، طرحواره‌ای از نیروگاه دودکش خورشیدی به همراه موازنه‌ی انرژی با توجه به جدول ۸، در نیروگاه نشان داده می‌شود. در نمایش موازنه‌ی انرژی اعداد کوچک در شکل نشان داده نشده است. با توجه به این شکل،

با توجه به داده‌های جداول ۵ تا ۷، دقت با بیشتر شدن تعداد تکرار در الگوریتم بهبود می‌یابد. با بیشتر شدن تعداد تکرارها، تعداد حالات مورد بررسی برای جواب نیز بیشتر شده و در نتیجه بهبود جواب نیز حاصل می‌گردد.

در جدول ۸، داده‌های مربوط به تحلیل انرژی با توجه به داده‌های جدول ۵، برای نمونه، بیان می‌شود. در این جدول پارامتر e ، بیانگر درصد انرژی نسبت به انرژی کل ورودی، می‌باشد و توزیع انرژی که از خورشید به نیروگاه می‌رسد، بیان می‌شود. بیشترین درصد انرژی ورودی صرف افزایش دمای سطح زمین زیر کلکتور می‌گردد و دمای زمین در این قسمت بالاترین دما در نیروگاه می‌باشد. در عمل نیز این اتفاق رخ داده و زمین گرمای خورشید را جذب کرده و دمای سطح آن بالا می‌رود و سپس این انرژی به هوای داخل و بخش‌های دیگر نیروگاه انتقال می‌یابد. سهم عمده انتقال حرارت در نیروگاه به صورت تشعشعی می‌باشد.

جدول ۸- داده‌های مربوط به انرژی بر حسب پارامترهای

جدول ۵ و تابع بهینه سازی مینیمم RMSE

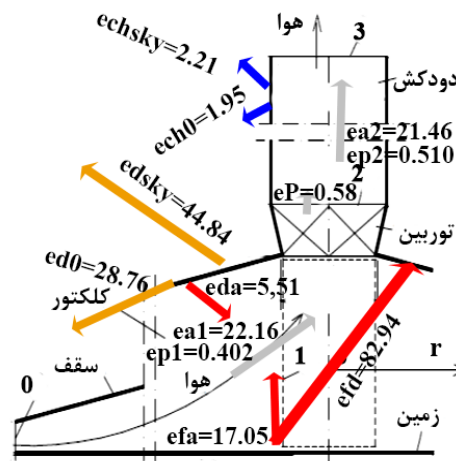
پارامتر	واحد	مقادیر مرجع [۲۵]	کد SA	کد PSO
-	-	-	It=500000	
EP	kW	229	285.7862	213.026
ea1	%	22.99	22.1258	23.1458
ea2	%	22.24	21.3877	22.4094
ew1	%	4.63E-04	4.09E-04	0.00039
ew2	%	1.93E-04	1.58E-04	0.00015
ep1	%	0.3994	0.3737	0.4124
ep2	%	0.5118	0.4819	0.5253
efa	%	17.81	17.7884	17.7785
efd	%	77.19	81.1943	82.2214
eda	%	5.577	5.7802	5.7144
ed0	%	26.05	28.0095	28.3533
edsky	%	44.21	43.7511	44.2497
ech0	%	0.9	1.3930	1.9596
echsky	%	1.7	1.9728	2.2101
eP	%	0.64	0.8358	0.6230

براساس داده‌های جدول ۸، درصد کمی، از انرژی، نسبت به انرژی کل ورودی به نیروگاه به توان تبدیل می‌شود (تقریباً ۰/۶۰ درصد) و انرژی ورودی بیشتر باعث بالا رفتن دمای سطوح می‌شود که نشان دهنده‌ی اتلاف انرژی می‌باشد. در نتیجه مقدار راندمان حرارتی نیروگاه دودکش خورشیدی کم است. با توجه به انتقال حرارت کم به هوای داخل کلکتور، برای بالا بردن توان نیروگاه دودکش خورشیدی، باید انتقال حرارت به سیال داخل نیروگاه افزایش یابد. برای این منظور می‌توانیم آشفتگی در جریان داخل کلکتور ایجاد

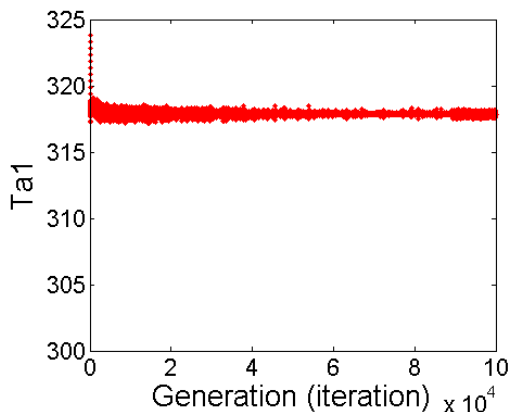
انرژی انتقال یافته به هوای داخل نیروگاه از انرژی که صرف بالا بردن دمای سطوح می گردد، کمتر است، دلیل این امر کم بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی و بالا بودن اتلاف حرارتی است.

در شکل های (۵)، (۶)، (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) روند همگرایی الگوریتم PSO، بترتیب برای w_1 ، T_{ch} ، T_{a1} ، T_{dE} ، T_{fE} و E_p نشان داده می شود و در آن مجموعه جواب های ممکن و جواب خروجی تعیین می گردد.

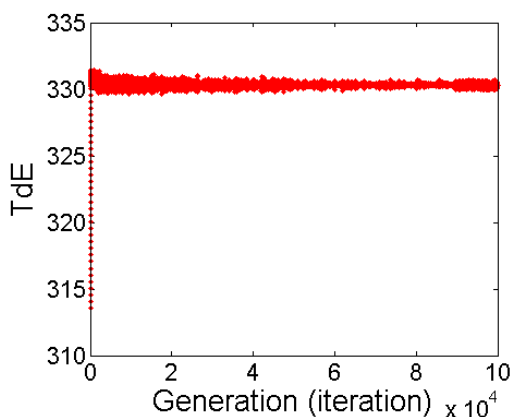
بیشترین میزان انرژی بین زمین و سقف مبادله می شود. که به دلیل اختلاف دما سهم عمده ی انتقال حرارت به صورت تشعشعی، راندمان حرارتی نیروگاه کم و اتلاف حرارتی آن زیاد می باشد.



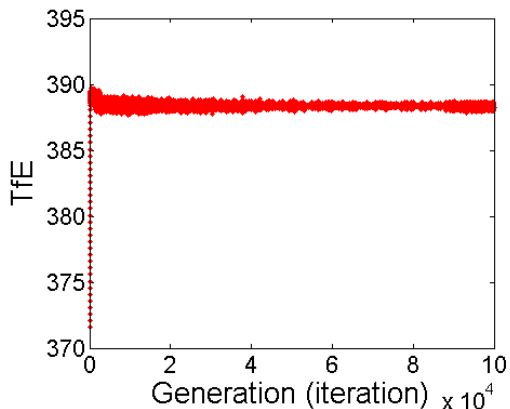
شکل ۴- موازنه ی انرژی در نیروگاه دودکش خورشیدی



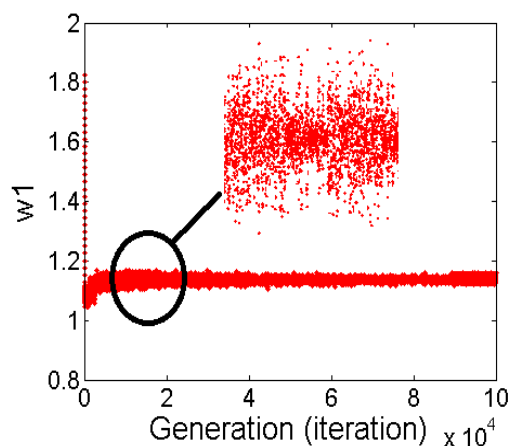
شکل ۷- روند همگرایی الگوریتم PSO، برای T_{a1}



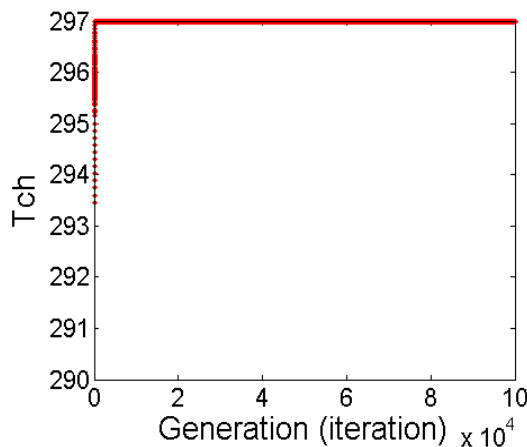
شکل ۸- روند همگرایی الگوریتم PSO، برای T_{dE}



شکل ۹- روند همگرایی الگوریتم PSO، برای T_{fE}



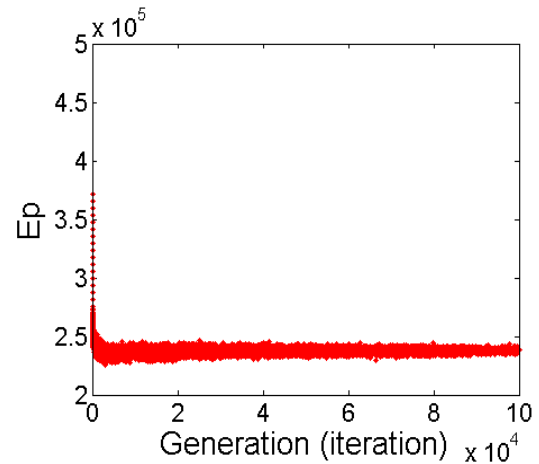
شکل ۵- روند همگرایی الگوریتم PSO، برای w_1



شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم PSO، برای T_{ch}

ابعاد نیروگاه مانزانارس اسپانیا ارزیابی شده است. توان نیروگاه نسبت به کل انرژی ورودی سنجیده می‌شود. همچنین موازنه‌ی انرژی برای نیروگاه انجام شده و دمای سطوح مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. تأثیر تغییر ابعاد هندسی بر موازنه‌ی انرژی در نیروگاه نیز تحلیل می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که میزان توان نسبت به کل انرژی ورودی عددی کوچک است و در نتیجه می‌توان گفت راندمان حرارتی نیروگاه کم است و مقدار توان به انرژی ورودی تقریباً ۰/۶ درصد می‌باشد. بیشترین سهم از انرژی ورودی صرف بالا بردن دمای سطوح می‌شود. در نتیجه اتلاف انرژی عدد بزرگی است. با تغییر در ابعاد هندسی نیروگاه، تغییر دمای سطوح نیروگاه عدد بزرگی نیست و افزایش ابعاد هندسی باعث بیشتر شدن توان نیروگاه می‌گردد.



شکل ۱۰- روند همگرایی الگوریتم PSO. برای Ep

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از یک مدل ریاضی، بررسی جامعی از انرژی در نیروگاه دودکش خورشیدی صورت می‌گیرد. میزان توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی با توجه به

اصطلاحات

D	قطر، m	Pr	عدد پرانتل
d	$10^{-5} \times 9.973 \times 10^{-9}$ ، ثابت در رابطه‌ی ۲۲، kg/m^3	P	فشار، Pa
E	انرژی، W	R	۲۸۷/۰۴، ثابت گاز، j/kg.k
e	انرژی، %	Re	عدد رینولدز
e	۱/۲۱۷، ثابت در رابطه‌ی ۲۲، kg/m^3	r	مختصه شعاعی
b	اکسرژی، %	r _T	افت فشار نسبی در توربین
g	شتاب گرانش، m/s^2	S	تشعشع، W/m^2
H	ارتفاع، m	T	دما، k
H _e	ارتفاع دهنه ی ورودی هوا، m	w	سرعت جریان، m/s
H _T	ارتفاع توربین، m	α	ضریب جذب
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $\text{W/m}^2.\text{k}$	β	زاویه، درجه
k	ضریب رسانش حرارتی، W/m.k	ΔB	اتلاف اکسرژی، W
m	دبی هوا، kg/s	Δb	اتلاف اکسرژی، %
Nu	عدد ناسلت	ε	قابلیت انتشار
P	توان، W	ϕ	ضریب شکل تشعشع
η	راندمان	ρ	چگالی، kg/m^3
k	توان آیزنروپیک	σ	5.67×10^{-8} ، ثابت تشعشع بولتزمن، $\text{W/m}^2.\text{k}^4$
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s	τ	قابلیت انتقال نور
A	مساحت، m^2	b	3.086×10^{-6} ، ثابت در رابطه‌ی ۲۲، s^{-1}
a	۹/۷۸۰۷، ثابت در رابطه‌ی ۲۲، m/s^2	C _D	ضریب ضخامت دیوار دودکش
B	اکسرژی، W	C _p	گرمای ویژه در فشار ثابت، j/kg.k

			زیرنویس
0	محیط	a	هوا
1,2,3	محل نشان داده شده در شکل ۱	ch	دودکش
P	پتانسیل	cv	جابه‌جایی
R	بازتابش	d	سقف
Q	حرارت	E	موثر
S	خورشید	f	کف
T	توربین	H	ارتفاع
w	سرعت	P	توان
x,y	سطح متفاوت		

مراجع

- [1] P. Guo, J. Li, Y. Wang, Y. Liu, "Numerical analysis of the optimal turbine pressure drop ratio in a solar chimney power plant", *Solar Energy*, Vol. 98, 2013, pp. 42–48.
- [2] P. Guo, J. Li, Y. Wang, Y. Wang, "Evaluation of the optimal turbine pressure drop ratio for a solar chimney power plant", *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, 2016, pp. 14–22.
- [3] P. Guo, Y. Wang, J. Li, Y. Wang, "Thermodynamic analysis of a solar chimney power plant system with soil heat storage", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, 2016, pp. 1076–1084.
- [4] S.K. Patel, D. Prasad, M.R. Ahmed, "Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant", *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, 2014, pp. 424–431.
- [5] S. Djimli, A. Chaker, "Numerical Study of the Solar Chimney Power Plant Performance in the Region of M'Sila-Algeria", *RE&PQJ*, Vol. 1, No. 12, 2014, pp. 71–75.
- [6] P.J. Cottam, P. Duffour, P. Lindstrand, P. Fromme, "Effect of canopy profile on solar thermal chimney performance", *Solar Energy*, Vol. 129, 2016, pp. 286–296.
- [7] A. Asnaghi, S.M. Ladjevardi, "Solar chimney power plant performance in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, 2012, pp. 3383–3390.
- [8] C.B. Maia, J.O. Castro Silva, L. Cabezas-Gómez, S.M. Hanriot, A.G. Ferreira, "Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, 2013, pp. 350–361.
- [9] F.L. Rashid, E.Q. Hussein, H.N. Azziz, "Design of solar chimney with spherical collector for electricity production", *Eastern Academic Journal*, No. 3, 2015, pp. 101–109.
- [10] S. Nasirivatan, A. Kasaeian, M. Ghalamchi, M. Ghalamchi, "Performance optimization of solar chimney power plant using electric/corona wind", *Journal of Electrostatics*, Vol. 78, 2015, pp. 22–30.
- [11] C.F. Kirstein, T.W.V. Backstrom, "Flow through a solar chimney power plant collector-to-chimney transition section", *Journal Solar Energy Engineering*, Vol. 128, No. 3, 2006, pp. 312–317.
- [12] A. Koonsrisuk, T. Chitsomboon, "Dynamic similarity in solar chimney modeling", *Solar Energy*, Vol. 81, No. 12, 2007, pp. 1439–1446.

- [13] T.P. Fluri, T.W. VonBackstrom, "Comparison of modelling approaches and layouts for solar chimney turbines", *Solar Energy*, Vol. 82, No. 3, 2008, pp. 46–239.
- [14] Fluri, T.P., VonBackstrom, T.W. (2008). "Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant". *Solar Energy*, Vol. 82, No. 11, pp. 999–1008.
- [15] A. Koonsrisuk, T. Chitsomboon, "Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants", *Energy*, Vol. 51, 2013, pp. 400–406.
- [16] T. Ming, X. Wang, R.K. Richter, W. Liu, T. Wu, Y. Pan, "Numerical analysis on the influence of ambient crosswind on the performance of solar updraft power plant system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 8, 2012, pp. 5567–5583.
- [17] T. Ming, W. Liu, Y. Pan, G. Xu, "Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer", *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 10, 2008, pp. 2872–2879.
- [18] T. Ming, W. Liu, G. Xu, Y. Xiong, X. Guan, Y. Pan, "Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine", *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 5, 2008, pp. 897–905
- [19] X. Zhou, J. Yang, B. Xiao, G. Hou, F. Xing, "Analysis of chimney height for solar chimney power plant", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 1, 2009, pp. 178–185.
- [20] J.Y. Li, P.H. Guo, Y. Wang, "Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines", *Renewable Energy*, Vol. 47, 2012, pp. 21–28.
- [21] T.W. Von Backström, A.J. Gannon, "Solar chimney turbine characteristics", *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1, 2004, pp. 235–241.
- [22] S.B. Thakre, L.B. Bhuyar, S.V. Dahake, P. Wankhade, "Mathematical modeling of temperature lapse rate in solar chimney power plant", *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering*, Vol. 13, No. 1, 2013, pp. 1417–1423.
- [23] R. Petela, "Thermodynamic study of a simplified model of the solar chimney power plant", *Solar Energy*, Vol. 83, No. 1, 2009, pp. 94–107.
- [۲۴] ویکی پدیا (خرداد ۱۳۹۵)، الگوریتم_تبرید_شبیه‌سازی_شده. https://fa.wikipedia.org/wiki/الگوریتم_تبرید_شبیه‌سازی_شده
- [۲۵] ویکی پدیا (خرداد ۱۳۹۵)، روش_بهینه‌سازی_ازدحام_ذرات. https://fa.wikipedia.org/wiki/روش_بهینه‌سازی_ازدحام_ذرات
- [26] H. Pastohr, O. Kornandt, K. Gurlebeck, "Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant", *Int. J. Energy Res.*, Vol. 28, No. 6, 2004, pp. 495–510.
- [27] T.W. Von Backstrom, T.P. Fluri, "Maximum fluid power condition in solar chimney power plants – An analytical approach", *Solar Energy*, Vol. 80, No. 11, 2006, pp. 1417–1423.
- [28] A. Koonsrisuk, T. Chitsomboon, "Mathematical modeling of solar chimney power plants", *Energy*, Vol. 51, 2013, pp. 314–322.
- [29] R. Petela, "Influence of gravity on the exergy of substance", *Int. J. Exergy*, Vol. 5, No. 1, 2008, pp. 1–17.