

## مدل‌سازی ریاضی نیروگاه دودکش خورشیدی برای وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان

سید حسین فلاح<sup>۱</sup>، محمدصادق ولی‌پور<sup>\*۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

s\_h\_fallah@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

mshvalipour@semnan.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک مدل ریاضی برای بررسی عملکرد و تولید توان در یک نیروگاه دودکش خورشیدی در وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان توسعه داده شده است. با استفاده از این مدل ریاضی، میزان توان تولیدی یک نیروگاه دودکش خورشیدی، برای وضعیت آب‌وهوایی سمنان بررسی شده است. ابتدا معادلات حاکم بر نیروگاه نوشته شده سپس مجموعه معادلات و روابط کمکی مرتبط با استفاده از روش‌های تکرار مبتنی بر سعی و خطا حل شدند. برای بررسی صحت و دقت مدل از داده‌های اندازه‌گیری‌شده نیروگاه مانزانارس اسپانیا و نتایج موجود در ادبیات کار استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد نیروگاه دودکش خورشیدی در وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان عملکرد مناسبی دارد، توان ماکزیمم در سه مقطع زمانی برای شهر سمنان، از توان نیروگاه مانزانارس کمتر است، اما این اختلاف کم است. ماه فرودین با توان ۴۹/۲۶ کیلووات، بیشترین توان را در سه تاریخ به خود اختصاص داده است، به‌ازای هر ۵ درجه افزایش دمای ورودی کلکتور، توان نیروگاه تقریباً ۳ درصد کاهش می‌یابد. از میان ابعاد هندسی نیروگاه، تغییر ارتفاع دودکش تأثیر بیشتری بر توان دارد، در بین پارامترها، شدت تشعشع بیشترین تأثیر را بر توان نیروگاه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** نیروگاه دودکش خورشیدی، مدل‌سازی ریاضی، انرژی خورشیدی، تولید توان، شهر سمنان.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر رشد جمعیت، توسعه صنعت و بالارفتن سطح استاندارد زندگی سرعت مصرف منابع طبیعی را بالا برده است. افزایش سرعت مصرف سوخت‌های فسیلی، میزان آلودگی‌ها و تأثیر اثر گلخانه‌ای بر جو را به صورت قابل توجهی افزایش داده است. این مسائل باعث تغییرات آب‌وهوایی شده است که این تغییرات مطلوب نیست و در نتیجه، زندگی گونه‌های موجودات زنده در معرض خطر قرار می‌گیرد.

برای کمک به حل مطالب بیان‌شده، به ویژه کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای و آلودگی محیط زیست، استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند راهکار مناسبی باشد. یکی از این راهکارها استفاده از انرژی خورشید و تکنولوژی‌های مربوط به آن، مانند نیروگاه دودکش خورشیدی است.

تکنولوژی دودکش خورشیدی برای تولید توان یکی از تکنولوژی‌های انرژی خورشیدی و نیروگاه دودکش خورشیدی (SCPP)<sup>۱</sup> نمونه‌ای از این تکنولوژی است که می‌تواند تشعشع مستقیم و پراکنده خورشید را جذب کند و بخشی از این انرژی با اثر گلخانه‌ای به توان الکتریکی تبدیل می‌شود.

نیروگاه دودکش خورشیدی از سه بخش اصلی کلکتور (شامل سقف با صفحه شفاف و کف آن سطح زمین)، دودکش و واحد تبدیل توان (PCU)<sup>۲</sup> تشکیل می‌شود. واحد تبدیل توان شامل یک یا چند توربین و ژنراتور است، 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.

مفهوم نیروگاه دودکش خورشیدی را اولین بار دانشمند اسپانیایی به نام کابانیس<sup>۳</sup> در سال ۱۹۰۳ مطرح کرد، در سال ۱۹۳۱ گاندرا<sup>۴</sup> نیروگاه دودکش خورشیدی را تشریح و توصیف کرد. در سال ۱۹۷۰ مطالعات اساسی بر روی نیروگاه دودکش خورشیدی توسط اسپلیچ<sup>۵</sup> انجام شد، اسپلیچ این تکنولوژی را در یک همایش، در سال ۱۹۷۸ ارائه داد. پس از آن، اسپلیچ و همکارانش نیروگاهی را طراحی کردند که ساخت آن به‌عنوان نمونه اولیه نیروگاه دودکش خورشیدی در مانزانارس اسپانیا توسط آن‌ها انجام شد و مدت آن، طی دوره دوساله، بین سال ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۲ صورت گرفت [۱].

صحت و امکان‌پذیر بودن تکنولوژی نیروگاه دودکش خورشیدی با ساخت نمونه اولیه این نیروگاه در مانزانارس اسپانیا بیان شد و پس از آن، مطالعات گسترده‌ای در زمینه نیروگاه دودکش خورشیدی صورت گرفت.

اسپلیچ [۲] مقدار هزینه تمام اجزای نیروگاه را برای اندازه‌های مختلف نیروگاه ارائه داد و همچنین قیمت برق، نرخ بهره و دوره استهلاک را نیز مورد بررسی قرار داد. اسپلیچ و همکاران [۳] هزینه اجزای نیروگاه را برای اندازه‌های مختلف با پارامترهای هزینه‌ای ثابت مانند قیمت برق و نرخ بهره، مورد بررسی قرار دادند.

فلوری و همکاران [۴] مدل هزینه را برای نیروگاه دودکش خورشیدی ارائه کرده و نتایج حاصل از آن را با مدل‌های قبلی مورد مقایسه قرار دادند. در این مدل جزئیات بیشتری از هزینه، مانند هزینه واحد تبدیل توان ارائه شده است.

پاتل و همکاران [۵] تأثیر پارامترهای هندسی نیروگاه را بر عملکرد نیروگاه مورد بررسی قرار داده و در این بررسی از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۱</sup> و نرم‌افزار ANSYS-CFX استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که توان نیروگاه، به ابعاد هندسی نیروگاه وابسته است و برای توان ماکزیمم ابعاد بهینه وجود دارد.

غلامعلی‌زاده و کیم [۶] با استفاده از مدل تشعشع در نرم‌افزار ANSYS Fluent شبیه‌سازی سه‌بعدی را برای بررسی اثر گلخانه‌ای در نیروگاه دودکش خورشیدی انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار نسبت فشار توربین با تشعشع رابطه مستقیم دارد.

گوو و همکاران [۷-۹] تحلیل ترمودینامیکی و تحلیل عددی با نرم‌افزار ANSYS Fluent برای نسبت فشار بهینه توربین (نسبت اختلاف فشار قبل و بعد توربین به اختلاف فشار کل)، مقایسه نسبت بهینه افت فشار توربین در دو حالت کلکتور مربعی و کلکتور دایره‌ای و توان در دو حالت وجود لایه ذخیره انرژی و عدم وجود لایه ذخیره انرژی را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی‌ها، نسبت فشار بهینه توربین برای داده‌های مانزانارس ۰/۹ گزارش شده است، اتلاف آیرودینامیک لحاظ‌شده در شبیه‌سازی عددی، بر نسبت فشار بهینه توربین مؤثر است، با تغییر در شکل کلکتور نسبت فشار بهینه توربین تغییر محسوسی نمی‌کند و وجود لایه ذخیره انرژی کاملاً بر توان نیروگاه تأثیرگذار است.

چرگوی و همکاران [۱۰] تحلیل عددی را برای نیروگاه دودکش خورشیدی انجام دادند و در آن، پارامترهایی مانند توزیع دما، سرعت به صورت بی‌بعد در اعداد رایلی متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.

1. Solar Chimney Power Plant
2. Power Conversion Unit
3. Cabanyes
4. Gunther
5. Schlaich

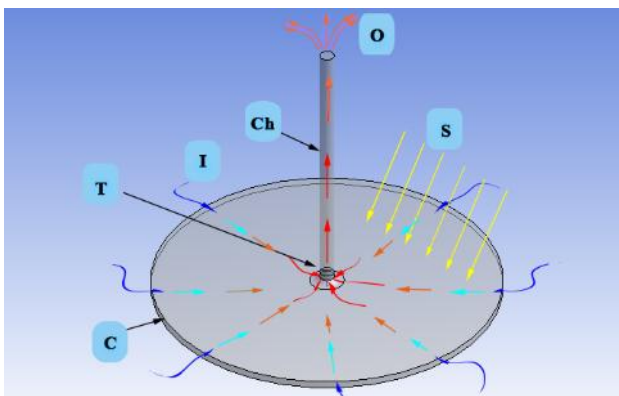
می‌دهد و مقدار آن تقریباً  $3/8$  متر بر ثانیه است.

سکیر و همکاران [۱۹] طراحی، ساخت و تست عملکرد یک نیروگاه دودکش خورشیدی در مقیاس کوچک را انجام دادند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از یک مدل تئوری، یک نمونه آزمایشگاهی نیروگاه دودکش خورشیدی با مساحت کلکتور تقریبی  $16/4$  مترمربع را مورد بررسی قرار می‌دهند که ماکزیمم توان این نمونه آزمایشگاهی به ۲۱ وات می‌رسد.

رشید و همکاران [۲۰] طراحی یک نیروگاه دودکش خورشیدی را با یک مدل تحلیلی انجام دادند. نسیری وطن و همکاران [۲۱] تأثیر گردباد<sup>۳</sup> بر نیروگاه دودکش خورشیدی را با مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که گردباد باعث افزایش ضریب جابجایی در کلکتور می‌شود.

در زمینه نیروگاه دودکش خورشیدی، مطالعات متفاوتی صورت گرفته، اما در این بررسی‌ها مدل‌سازی ریاضی نیروگاه و شبیه‌سازی دقیق توربین کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، همچنین ارزیابی توان نیروگاه دودکش خورشیدی در شهر سمنان صورت نگرفته است. در این مطالعه با توجه به یک مدل ریاضی برای نیروگاه دودکش خورشیدی، پارامترهایی مانند توان، افزایش دما و نسبت فشار بهینه برای توربین، دمای سطوح زمین و سقف کلکتور در خروجی کلکتور، در سه تاریخ مختلف از وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج حاصل از این مطالعه، با نتایج نیروگاه مانرانارس مقایسه می‌شود. در شکل (۱) بخش‌ها و پارامترهای مختلف، در نیروگاه دودکش خورشیدی که در مطالعه لحاظ گردیده است، نشان داده می‌شود. همچنین در شکل (۱) روند تغییر حرکت سیال (هوا) و تغییر دمای سیال در نیروگاه دودکش خورشیدی به صورت شماتیک نشان داده می‌شود.



C: کلکتور  
Ch: دودکش  
I: هوای ورودی  
O: هوای گرم خروجی  
S: تشعشع خورشید  
T: توربین

(الف)

نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که در عدد رایلی  $10^8$  رفتار سیال متفاوت بوده و جریان سیال آشفته است.

مینگ و همکاران [۱۱] تحلیل عددی، برای تأثیر باد متقاطع بر عملکرد نیروگاه را انجام دادند. تحلیل آن‌ها روی مشخصات مشابه با نمونه مانرانارس صورت گرفته است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که باد متقاطع محیط بر عملکرد دودکش خورشیدی تأثیرگذار است به طوری که اگر ضعیف یا زیاد قوی باشد، میدان جریان را تخریب می‌کند و توان خروجی را کاهش می‌دهد.

دجیملی و چاکر [۱۲] با نرم‌افزار ANSYS Fluent امکان‌پذیر بودن ساخت نیروگاه دودکش خورشیدی را در منطقه‌ای<sup>۲</sup> از الجزایر بررسی کردند و تأثیر دمای محیط بر عملکرد نیروگاه را نیز مورد بررسی قرار دادند. کتام و همکاران [۱۳] تأثیر پروفیل کلکتور در محل اتصال به دودکش را در نیروگاه دودکش خورشیدی مورد بررسی قرار دادند.

استغی و لاجوردی [۱۴] عملکرد دودکش خورشیدی را در ایران را مورد بررسی قرار دادند و از نرم‌افزار فلوئنت برای تحلیل استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که ناحیه مرکزی و جنوبی ایران به دلیل شدت تشعشع مناسب و ساعات آفتابی بیشتر برای تولید توان با نیروگاه دودکش خورشیدی مناسب‌اند. سنجی [۱۵] عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی در ایران را ارزیابی کرد و برای این تحلیل پنج ناحیه (آبادان، اراک، تهران، یزد و زنجان) از ایران را مورد بررسی قرار داد. بررسی او نشان می‌دهد که بیشترین تولید توان برای شهر زنجان است.

مایا و همکاران [۱۶] 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 رابطه مستقیم دارد. پنتلا [۱۷] یک تحلیل ترمودینامیکی (تحلیل انرژی و اکسرژی) را برای نیروگاه دودکش خورشیدی انجام داد. در این مطالعه، وابستگی انرژی خورشید به توان و اتلافات از کف و سقف کلکتور با مدل ریاضی بررسی شده که کف کلکتور دارای بیشترین اتلاف است.

همدان [۱۸] داده‌های آزمایشگاهی نیروگاه دودکش خورشیدی را مورد بررسی قرار داد. این مدل آزمایشگاهی در العین امارات ساخته شده است. داده‌های این نیروگاه در یک دوره سه روزه، در دسامبر ۲۰۱۱ جمع آوری شده است. این مدل دارای مساحت کلکتور  $100$  مترمربع و ارتفاع دودکش  $8/25$  متر است. براساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط همدان، بیشترین سرعت هوا در ساعت حدوداً یک بعدازظهر رخ

1. Rayleigh Number
2. M'sila

## مدل‌سازی ریاضی نیروگاه دودکش خورشیدی برای وضعیت... ۷۳

کل را نسبت فشار ( $x$ ) تعریف می‌کنیم که یک مقدار بهینه برای آن در نیروگاه وجود دارد. این مقدار بهینه در مجلات بین ۰/۶۶۶ و ۰/۹۷ گزارش شده است. برای رابطه بین نسبت فشار ( $x$ )، اختلاف فشار کل ( $\Delta P_{tot}$ ) و اختلاف فشار مربوط به توربین ( $\Delta P_{turb}$ ) وجود دارد:

$$\Delta P_{turb} = x \Delta P_{tot} \quad (2)$$

### ۲.۳. معادلات حاکم در محاسبه توان

#### ۱.۲.۳. معادلات اصلی

در این بخش، معادلات حاکم بر سیال (هوا) در کلکتور و دودکش به صورت جداگانه بیان می‌شود، همچنین توان خروجی از توربین بیان می‌گردد. برای معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی برای هوا، در کلکتور وجود دارد [۲۲]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (3)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\rho g dZ}{P} - \frac{\rho V^2 dV}{P V} \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$C_p dT + V dV + g dZ = dq \quad (5)$$

در معادلات قبلی،  $V$ ،  $T$ ،  $P$ ،  $A$ ،  $g$ ،  $Z$ ،  $q$ ،  $C_p$  و  $\rho$  به ترتیب، سرعت، دما، فشار، مساحت، شتاب گرانش، محور مختصات در راستای دودکش، شار حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و چگالی است. با تعریف سرعت صوت و عدد ماخ، برای گاز ایدئال، معادله (۴) در ادامه بازنویسی می‌شود.

$$a = \sqrt{\gamma R T} \quad (6)$$

$$M = \frac{V}{a} \quad (7)$$

بر اساس دو رابطه قبل و جایگزینی آن‌ها در معادله (۴)، این معادله

به صورت زیر بازنویسی می‌شود و عبارت است از:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{gdZ}{RT} - \gamma M^2 \frac{dV}{V} \quad (8)$$

معادله انرژی در کلکتور (معادله ۵) نیز با تعریف عدد ماخ<sup>۱</sup> برای

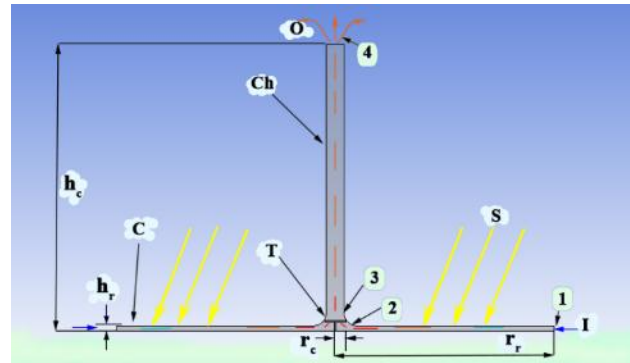
گاز ایدئال بازنویسی می‌شود. برای گاز ایدئال وجود دارد:

$$R = C_p \left( \gamma - \frac{1}{\gamma} \right) \quad (9)$$

در نتیجه معادله انرژی در کلکتور به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{dT}{T} = -(\gamma - 1) M^2 \frac{dV}{V} - \frac{gdZ}{C_p T} + \frac{dq}{C_p T} \quad (10)$$

در روابط و معادلات بیان شده،  $M$ ،  $a$ ،  $R$  و  $\gamma$  به ترتیب، عدد ماخ،



شکل (۱): الف. شماتیک کلی از نیروگاه دودکش خورشیدی، ب. شماتیکی از برش طولی نیروگاه دودکش خورشیدی (ب)

شکل (۱): الف. شماتیک کلی از نیروگاه دودکش خورشیدی، ب. شماتیکی از برش طولی نیروگاه دودکش خورشیدی

## ۲. مدل مفهومی

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) گرم می‌شود و این هوای گرم در اثر جابه‌جایی طبیعی به سمت دودکش که در مرکز کلکتور قرار دارد، حرکت می‌کند و توربین را که در پایه دودکش قرار دارد، به حرکت در می‌آورد و واحد تبدیل توان، توان را تولید می‌کند. در نهایت هوای گرم پس از عبور از واحد تبدیل توان، در مسیر دودکش به مرور دچار کاهش دما و از دودکش به محیط خارج می‌شود. در بخش کلکتور، اختلاف دما در آن، اختلاف چگالی را بین بیرون و درون کلکتور ایجاد می‌کند و موجب می‌شود حرکت جریان هوا به طور پیوسته ادامه یابد. در حالت کلی اختلاف فشار، به دلیل اختلاف دما نسبت به دمای ورودی و وجود دودکش، در نیروگاه دودکش خورشیدی، حرکت پیوسته هوا را در نیروگاه ایجاد می‌کند.

## ۳. مدل ریاضی

### ۱.۳. نسبت فشار

اختلاف فشار کل نیروگاه می‌تواند به مؤلفه مربوط به توربین ( $turb$ )، مؤلفه دینامیکی ( $dyn$ ) و مؤلفه اصطکاکی تقسیم شود. فرض می‌گردد که مؤلفه اصطکاکی (افت اصطکاکی) برای اختلاف فشار کل ناچیز باشد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{turb} + \Delta P_{dyn} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\Delta P$  اختلاف فشار است. در اختلاف فشار کل، مؤلفه مربوط به توربین، برابر اختلاف فشار قبل و بعد توربین است. هرچه مقدار این مؤلفه به اختلاف فشار کل نزدیک‌تر باشد، عملکرد نیروگاه بهتر است. نسبت بین اختلاف فشار مربوط به توربین و اختلاف فشار

براساس رابطه (۱۹) دمای خروجی کلکتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_2 = T_1 + \frac{q'' A_r}{m C_p} \quad (20)$$

براساس اتلاف در کلکتور [۲۴]، حرارتی که بر توان نیروگاه تأثیرگذار است، از میزان تشعشع ورودی به کلکتور کمتر است:

$$q'' = \alpha S - U \Delta T \quad (21)$$

در نتیجه برای اختلاف دما بین ورودی و خروجی کلکتور که به تشعشع و دبی وابسته است ( $\Delta T = T_2 - T_1$ )، نیز در رابطه (۲۲) دارید [۲۳]:

$$\Delta T = \frac{\alpha S}{\frac{\dot{m} C_p}{A_r} + U} \quad (22)$$

در دو رابطه قبلی  $U$  و  $\alpha$  به ترتیب ضریب افت کلکتور و ضریب جذب کلکتور می‌باشند و  $\Delta T$  اختلاف دما در کلکتور را نشان می‌دهد. توان خروجی از توربین براساس روابط ترمودینامیک و معادله انرژی می‌تواند به صورت زیر بیان شود. برخی از فرضیات برای توربین شامل سرعت یکنواخت جریان در دیسک و جریان پایا می‌باشد [۲۲].

$$W_{ext} = m \int v dP \approx \frac{m}{\rho_{turb}} \Delta P_{turb} \quad (23)$$

اختلاف فشار توربین برابر اختلاف فشار قبل و بعد توربین است. با توجه به شکل (۱) اختلاف فشار بین مکان ۲ و ۳ لحاظ می‌گردد، برای چگالی توربین نیز میانگین چگالی بین این دو مکان منظور می‌شود. در نتیجه رابطه توان ساده‌تر می‌گردد و خواهد داشت:

$$W_{ext} = \frac{2m}{(\rho_2 + \rho_3)} (P_2 - P_3) \quad (24)$$

در رابطه بالا دبی جریان به چگالی، سطح مقطع و سرعت جریان در مکان مورد نظر وابسته است. دبی در ورودی علاوه بر موارد گفته شده به سرعت باد در ورودی و میزان تشعشع خورشید وابسته است. در دو رابطه قبل،  $W_{ext}$  و  $v$  به ترتیب، توان و حجم مخصوص می‌باشند. نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ و همچنین ابعاد نیروگاه مانند  $r_c$  که در روابط استفاده می‌گردد، در شکل (۱) نشان داده می‌شود. برای معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی برای هوا در دودکش دارید [۲۲]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (25)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{dP}{\rho} + gdZ = -v dv \quad (26)$$

معادله انرژی:

$$C_p dT + v dv + gdZ = 0 \quad (27)$$

سرعت صوت، ثابت گاز ایدئال و نسبت گرمایی ویژه می‌باشند. معادله حالت برای هوا در کلکتور به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\frac{dP}{P} - \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0 \quad (11)$$

با ترکیب معادلات (۸)، (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{gdZ}{\gamma RT} - M^2 \frac{dV}{V} - \frac{dq}{C_p T} \quad (12)$$

سپس با ترکیب معادلات (۳) و (۱۲) رابطه (۱۳) بدست می‌آید:

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{(1-M^2)} \left( \frac{dA}{A} - \frac{dq}{C_p T} - \frac{gdZ}{\gamma RT} \right) \quad (13)$$

همچنین برای شار حرارتی وجود دارد:

$$dq = \frac{q'' dA_r}{m} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)  $q''$ ،  $A_r$  و  $m$  به ترتیب شار حرارتی، مساحت سقف کلکتور و دبی جرمی می‌باشند. با ترکیب معادلات (۸)، (۱۳) و (۱۴) دارید:

$$dP = -\frac{\rho gdZ}{(1-M^2)} + \frac{\rho V^2}{(1-M^2)} \left( \frac{dA}{A} - \frac{q'' dA_r}{m C_p T} \right) \quad (15)$$

با ساده‌سازی معادله (۱۵) که از معادلات پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی و حالت در کلکتور به دست آمده است، برای اختلاف فشار در کلکتور (نقاط ۲ و ۱ در شکل ۱) دارید [۲۳]:

$$P_2 - P_1 = \int_1^2 \frac{\rho V^2}{(1-M^2)} \left( \frac{dA}{A} - \frac{q'' dA_r}{m C_p T} \right) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) با توجه به اینکه عدد ماخ کوچک است، این عدد ناچیز در نظر گرفته می‌شود.  $q''$ ،  $C_p$  و  $m$  ثابت فرض می‌شوند.  $T$  و  $\rho$  پارامترهای حالت ۱ با توجه به شکل (۱) هستند. در نتیجه با ساده‌سازی این رابطه، برای اختلاف فشار نقاط ۱ و ۲ رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$P_2 - P_1 = \frac{m q''}{2\pi h_r^2 \rho_1 C_p T_1} \ln \frac{r_r}{r_c} - \frac{m^2}{2\rho_1} \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (17)$$

با توجه به رابطه (۱۷) به دلیل حرارت منتقل شده به کلکتور  $(m q'' / 2\pi h_r^2 \rho_1 C_p T_1)$ ، فشار در کلکتور افزایش می‌یابد. اما به دلیل افزایش جریان (ترم منفی در رابطه ۱۷)، فشار کاهش می‌یابد، اما اندازه این مقدار کاهش، به مراتب از مقدار افزایش فشار کوچک‌تر است.

براساس معادله انرژی در کلکتور (معادله ۵)، می‌توان افزایش دما در کلکتور را به دست آورد. حرارت منتقل شده از خورشید به کلکتور، به سرعت جریان در کلکتور، دبی و اختلاف دما وابسته است، در نتیجه با ساده‌سازی معادله (۵) رابه (۱۸) بدست می‌آید:

$$m C_p (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} m (V_2^2 - V_1^2) = q'' A_r \quad (18)$$

از آنجایی که محدوده سرعت در این نیروگاه پایین یا به عبارتی عدد ماخ کوچک است، تأثیر سرعت در رابطه قبل ناچیز فرض می‌شود، در نتیجه اختلاف دما در تشعشع ثابت، فقط به دبی جریان وابسته می‌گردد:

$$m C_p (T_2 - T_1) = q'' A_r \quad (19)$$

سقف کلکتور و سقف کلکتور، دما برای این سطوح در خروجی کلکتور تقریب زده می شود. سه مکانیزم انتقال حرارت رسانشی، جابه جایی و تشعشعی برای محاسبه دما سطوح مورد نظر، به کار گرفته می شود. در واقعیت، سقف کلکتور، قسمتی کمی از تشعشع وارد شده بر خود را جذب و قسمت دیگر را از خود عبور می دهد. این مقدار تشعشع عبوری، به سیال داخل کلکتور، سایر اجزا و سطح زمین زیر کلکتور می رسد. بر این اساس فرض می شود ضریب عبور تشعشع ( $\tau$ ) از سقف کلکتور ۰/۶۵ باشد. در نتیجه برای موازنه انتقال حرارت، در سطح زمین زیر کلکتور و سقف کلکتور، میزان تشعشع ورودی برای این دو سطح به ترتیب برابر  $\tau S$  و  $(1 - \tau)S$  است.

خواصی مانند چگالی هوای محیط ( $\rho_1$ )، چگالی سیال در خروجی کلکتور ( $\rho_f$ )، ضریب انبساط حرارتی هوای درون کلکتور ( $\beta$ )، ضریب رسانش سطح زمین زیر کلکتور ( $k_e$ )، عدد پرانتل ( $Pr$ ) ثابت و ضریب گسیل ( $\epsilon$ ) برای محیط و سطوح برابر ۱ در نظر گرفته می شود. همچنین انتقال حرارت رسانشی در کلکتور، به دلیل ضخامت کم آن ناچیز فرض می گردد، دمای سطح زمین زیر کلکتور و سقف کلکتور از دمای هوای داخل کلکتور بیشتر فرض می شود و انتقال حرارت بین سطح زمین زیر کلکتور، سقف کلکتور، هوای داخل کلکتور و هوای محیط مورد بررسی قرار می گیرد. در نتیجه برای موازنه انتقال حرارت در سقف کلکتور، تشعشع جذب شده توسط سقف، تبادل تشعشع بین دو سطح زمین و سقف کلکتور، تبادل تشعشع محیط با سیال داخل کلکتور، تبادل انتقال حرارت جابه جایی بین سطح سقف کلکتور و هوای داخل کلکتور و تبادل انتقال حرارت جابه جایی بین سطح سقف کلکتور و هوای محیط لحاظ می شود و در نتیجه:

$$(1 - \tau)S = -h_c(T_f - T_c) - h_1(T_1 - T_c) + \epsilon\sigma T_c^4 - \epsilon\sigma T_e^4 + \epsilon\sigma(T_f^4 - T_1^4) \quad (38)$$

در رابطه (۳۸)  $\sigma$ ،  $T_c$ ،  $T_f$ ،  $h_1$ ،  $T_1$ ،  $T_e$  و  $h_c$  به ترتیب، ثابت بولتزمن، دمای سقف کلکتور، دمای هوا در خروجی کلکتور، ضریب انتقال حرارت جابه جایی بین سقف کلکتور و هوای محیط، دمای محیط، دمای سطح زمین زیر کلکتور و ضریب انتقال حرارت جابه جایی بین سقف کلکتور و هوای داخل کلکتور می باشند. برای موازنه انتقال حرارت در سطح زمین زیر کلکتور، تشعشع جذب شده توسط سطح زمین، تبادل تشعشع بین دو سطح زمین و سقف کلکتور، تبادل انتقال حرارت جابه جایی بین سطح زمین و هوای داخل کلکتور و اتلاف حرارت به صورت انتقال حرارت رسانشی ثابت به عمق زمین لحاظ می شود. فرض می شود در عمق ۵ متر دما به دمای محیط برسد و دارید:

$$h_e(T_f - T_e) + \tau S + \epsilon\sigma T_c^4 - \epsilon\sigma T_e^4 = k_e \frac{(T_e - T_1)}{d} \quad (39)$$

معادله حالت برای هوا در دودکش به صورت زیر تعریف می شود [۲۲]:

$$\frac{dP}{P} - \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dT}{T} = 0 \quad (28)$$

با ترکیب معادلات (۲۵) و (۲۸) برای تغییر فشار در دودکش رابطه (۲۹) به دست می آید:

$$dP = -\rho g dz \quad (29)$$

وقتی که هوا در دودکش بدون مبادله حرارت و به آرامی به فشار هوای پایین تر منبسط می شود، برای میزان کاهش دما در دودکش به صورت زیر محاسبه می شود [۲۲]:

$$T = T_0 - \frac{g}{C_p} Z \quad (30)$$

فرض می شود هوا گاز ایدئال باشد و از معادله حالت برای گاز ایدئال پیروی کند، سپس با توجه به معادلات (۲۹) و (۳۰) برای فشار در خروجی دودکش دارید [۲۲]:

$$P_4 = P_1 \left(1 - \frac{g}{C_p T_1} h_c\right)^{\frac{C_p}{R}} \quad (31)$$

بر اساس معادله پیوستگی و اندازه حرکت، برای دودکش عمودی با ارتفاع  $h_c$  و مساحت سطح مقطع ثابت، برای فشار در نقطه ۳ وجود دارد [۲۳]:

$$P_3 = P_4 + \frac{1}{2}(\rho_3 + \rho_4)gh_c + \left(\frac{m}{A_c}\right)^2 \left(\frac{1}{\rho_4} - \frac{1}{\rho_3}\right) \quad (32)$$

### ۲.۲.۳. معادلات کمکی

برای فرایند در توربین فرض می گردد که فرایند آیزنتروپیک باشد، در نتیجه:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (33)$$

هوا به عنوان گاز ایدئال در نظر گرفته می شود و برای نقاط مختلف

با توجه به شکل (۱) دارید:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (34)$$

همچنین برای دما در نقطه ۴، با توجه به میزان کاهش دما در

دودکش، رابطه زیر استفاده می گردد [۲۲].

$$T_4 = T_3 - \frac{g}{C_p} h_c \quad (35)$$

اختلاف فشار کل برای نیروگاه اختلاف فشار بین نقاط ۱ و ۳ در

نظر گرفته می شود:

$$\Delta P_{tot} = P_1 - P_3 \quad (36)$$

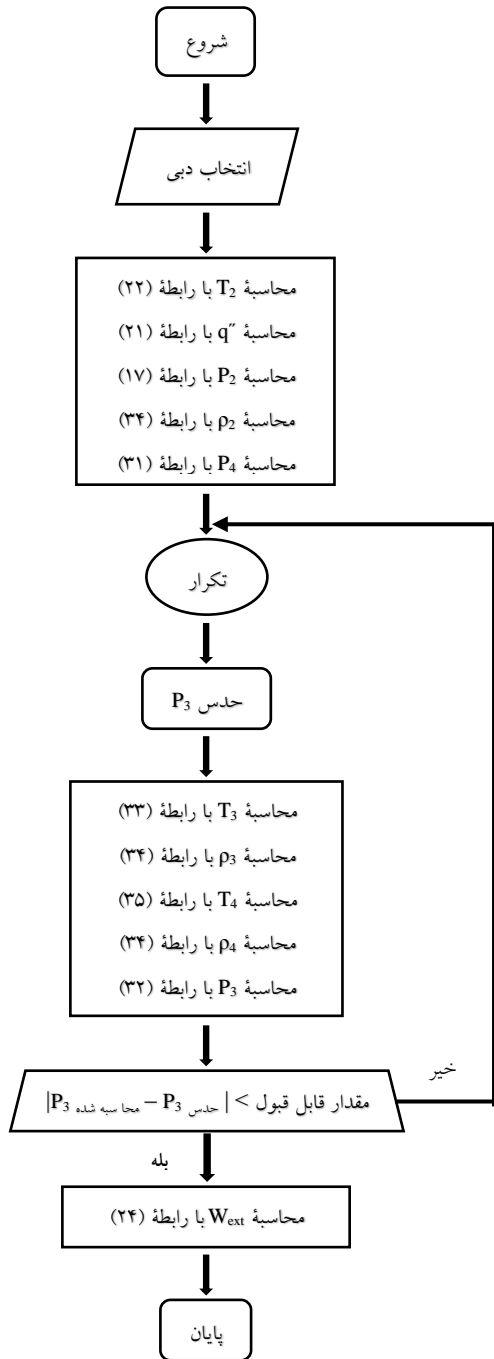
راندمان کلکتور ( $\eta_{coll}$ ) را نیز می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\eta_{coll} = \frac{q''}{S} \quad (37)$$

### ۳.۳. دمای سطح زمین و سقف کلکتور

در این قسمت، بر اساس موازنه انتقال حرارت برای سطح زمین زیر

محاسبه می‌شوند. پس از آن،  $P_3$  حدس زده می‌شود. آنگاه با توجه به روابط (۳۳)، (۳۴)، (۳۵)، (۳۶) و (۳۲)، مقادیر  $T_3$ ،  $\rho_3$ ،  $T_4$ ،  $\rho_4$  و  $P_3$  محاسبه می‌گردد و مقدار  $P_3$  حدس زده شده و  $P_3$  محاسبه شده با هم مقایسه و توان نیروگاه محاسبه می‌شود. در شکل (۲) روند حل معادلات با توجه به روابط بیان شده نشان داده می‌شود.



شکل (۲): فلوچارت حل معادلات برای محاسبه توان نیروگاه دودکش خورشیدی

۲.۴. محاسبه دمای سطح زمین و سقف کلکتور

براساس معادلات (۳۹ تا ۴۵) دمای سطوح مورد نظر با سعی و خطا به دست می‌آیند. ابتدا دبی جرمی انتخاب می‌شود و سپس دمای سطوح مورد نظر حدس زده می‌شود و دمای هوا در خروجی کلکتور با رابطه

در رابطه (۳۹)  $h_e$  و  $d$  به ترتیب، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح زمین زیر کلکتور و هوای داخل کلکتور و عمق زمین می‌باشند. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سقف کلکتور و هوای محیط، سرعت هوای محیط ( $u$ ) مؤثر است و در نتیجه [۶]:

$$h_1 = 3.87 + 0.0022 \left( \frac{u \rho_1 C_p}{Pr^{1/3}} \right) \quad (40)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سقف کلکتور و هوای داخل کلکتور و همچنین برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین سطح زمین زیر کلکتور و هوای داخل کلکتور، عدد ناسلت جریان اجباری ( $Nu_{force}$ ) و عدد ناسلت<sup>۱</sup> جریان طبیعی ( $Nu_{nat}$ ) در نظر گرفته می‌شود و برای سطح با دمای  $T$  و هوای داخل کلکتور با ضریب رسانش سیال  $k_f$  و ویسکوزیته  $\nu$ ، که این خواص در دمای میانگین سطح مورد نظر و دمای هوای داخل کلکتور لحاظ می‌گردند، ضریب جابه‌جایی  $h$  برای سطح مورد نظر برابر است با [۲۵]:

$$h = \left( Nu_{force} \frac{k_f}{2h_r} \right)^4 + \left( Nu_{nat} \frac{k_f}{h_r} \right)^4 \quad (41)$$

برای عدد ناسلت جریان طبیعی که به عدد گراشف ( $Gr$ ) و عدد پرانتل وابسته است و رابطه (۴۲) به شکل زیر وجود دارد:

$$Nu_{nat} = 0.115 (GrPr)^{1/3} \quad (42)$$

و نیز برای عدد گراشف:

$$Gr = \frac{g\beta(T - T_f)h_r^3}{\nu^2} \quad (43)$$

برای عدد ناسلت جریان اجباری که به عدد رینولدز ( $Re$ ) وابسته است:

$$Nu_{force} = 0.024 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (44)$$

برای عدد رینولدز<sup>۲</sup> در فاصله  $r$  از مرکز کلکتور:

$$Re = \frac{m}{\rho_f \pi \nu r} \quad (45)$$

۴. حل معادلات

۴.۱. محاسبه توان

برای محاسبه توان نیروگاه دودکش خورشیدی، معادلات (۱۷)، (۲۱)، (۲۲)، (۲۴)، (۳۱ تا ۳۵)، به صورت تحلیلی حل می‌شوند، اما با توجه به اینکه تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر است، در نتیجه با حدس یک پارامتر این معادلات با سعی و خطا حل می‌شوند. در حل این معادلات ابتدا دبی جرمی از صفر انتخاب می‌شود و با رشد یک واحد معادلات تکرار بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس  $T_2$  با رابطه (۲۲)،  $q''$  با رابطه (۲۱)،  $P_2$  با رابطه (۱۷)،  $\rho_2$  با رابطه (۳۴) و  $P_4$  با رابطه (۳۱)

1. Nusselt Number  
2. Reynolds Number

مدل سازی ریاضی نیروگاه دودکش خورشیدی برای وضعیت... ۷۷

در جدول (۳)، نتیجه اعتبارسنجی در این مطالعه، با مقاله مرجع و داده های حاصل از نیروگاه مانزانارس داده شده است. براساس داده های جدول (۳)، خطا کم است و داده های به دست آمده در این مطالعه، دقت خوبی دارند.

جدول (۱): ابعاد هندسی نیروگاه مانزانارس [۲۳]	
مقادیر	پارامتر
۱۲۲ m	شعاع متوسط سقف، $r_f$
۱/۸۵ m	ارتفاع متوسط سقف، $h_f$
۱۹۴/۶ m	ارتفاع دودکش، $h_c$
۵/۰۸ m	شعاع دودکش، $r_c$

جدول (۲): داده های نیروگاه مانزانارس برای اول سپتامبر ۱۹۸۹ [۲۶]	
مقادیر	پارامتر
۱۰۱۷ W/m <sup>2</sup>	تشنش خورشید، S
۲۹۱/۶۵ K	دمای محیط، $T_1$
۹۲۹۳۰ Pa	فشار محیط، $P_1$
۰/۶۵	ضریب جذب کلکتور، $\alpha$
۱۵ W/m <sup>2</sup> K	ضریب افت کلکتور، U
۰/۸۵	راندمان توربین
۰/۹	راندمان ژنراتور و جعبه دنده

جدول (۳): اعتبارسنجی برای کد نوشته شده در این مطالعه با مراجع			
نتایج	مدل تئوری مقاله	داده اندازه گیری شده مانزانارس [۲۳]	پارامتر
به دست آمده در این مطالعه	مرجع [۲۳]	۳۸	دمای خروجی کلکتور، $T_2$ (°C)
۴۱/۵	۴۱/۵	۴۸/۴	توان، $W_{ext}$ (kW)

با توجه به جدول (۳)، در داده های به دست آمده، دما یکسان با مدل تئوری مقاله مرجع، خطای آن با داده اندازه گیری شده مانزانارس برابر ۹/۲۱٪، توان با توان مدل تئوری مقاله مرجع تقریباً برابر و خطای آن با داده اندازه گیری شده مانزانارس برابر ۰/۱۴٪ استنتاج می شود.

۲.۵. نتایج مدل

داده های تشنش اندازه گیری شده در دسترس، برای شهر سمنان، در سه ماه مختلف که تاریخ آن ها در ادامه بیان می شود، موجود است. به همین دلیل، انتخاب داده ها در این سه تاریخ از این سه ماه صورت می گیرد. داده های اندازه گیری تشنش (داده های شرکت سولار کار شهرک صنعتی

(۲۲) محاسبه می گردد. سپس با توجه به معادلات حاکم دمای سطوح در خروجی کلکتور با روش سعی و خطا به دست می آیند. در شکل (۳) روند محاسبه دمای سطوح نشان داده می شود.

۵. نتایج و بحث

۱.۵. اعتبارسنجی نتایج

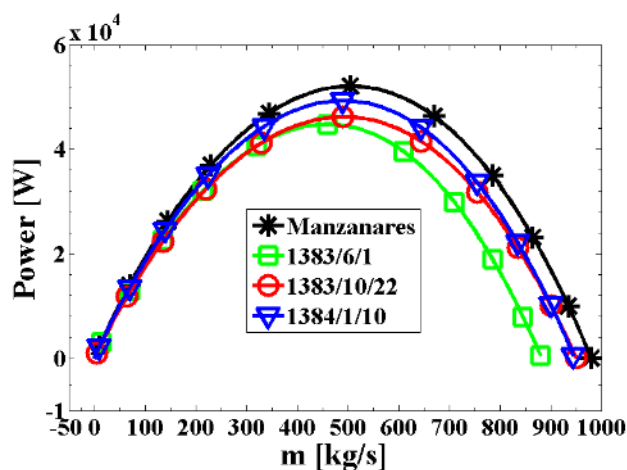
ارزیابی و اعتبارسنجی براساس ابعاد نیروگاه مانزانارس صورت می گیرد. ابعاد این نیروگاه در جدول (۱) و داده های اندازه گیری شده از نیروگاه مانزانارس در جدول (۲) داده شده است. تاریخ این داده ها ۱۳۶۸/۶/۱۰ شمسی (9/1/1989 میلادی) می باشد.



شکل (۳): فلوچارت حل معادلات برای محاسبه دمای سطوح زمین زیر کلکتور و سقف کلکتور



در شکل (۵) توان نیروگاه برای ابعاد مانزانارس در سه تاریخ مختلف که در جدول (۴) بیان شد و داده‌های مانزانارس در دبی‌های متفاوت نشان داده می‌شود. همچنین در شکل (۶) توان ماکزیمم روزانه برای سه تاریخ مختلف شهر سمنان نشان داده می‌شود. براساس شکل (۵) توان نیروگاه مانزانارس بیشتر از توان نیروگاه، بر مبنای داده‌های سه تاریخ ذکر شده می‌باشد. همچنین توان ماکزیمم داده ماه شهریور (۴۴/۷۶ کیلووات) کمترین توان را به خود اختصاص می‌دهد. از آنجایی که تشعشع ماکزیمم برای هر سه تاریخ در محاسبات لحاظ شده و مقدار آن در هر سه حالت نزدیک به هم است، در نتیجه برای این سه حالت، ترکیب مناسبی از تشعشع، دما و فشار ورودی می‌تواند بیشترین توان را به خود اختصاص دهد.

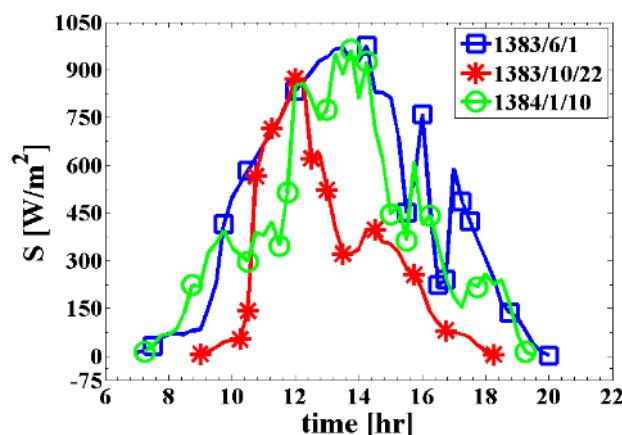


شکل (۵): توان نیروگاه برای داده‌های مانزانارس و سه تاریخ شهر سمنان

با توجه به شکل (۵) در تاریخ ۱۳۸۴/۱/۱۰ (ماه فروردین)، توان ماکزیمم ۴۹/۲۶ کیلووات است که نسبت به دو تاریخ دیگر، توان ماکزیمم بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. همچنین مقدار توان ماکزیمم برای داده مانزانارس به ۵۲/۰۵ کیلووات می‌رسد. کمتر بودن توان در تاریخ شهریور، دلیل بر تولید توان پایین نیست، زیرا میانگین توان به دست آمده در طول روز اهمیت دارد. براساس شکل (۴) در شهریور، هم تعداد ساعات آفتابی بیشتر و هم میزان تشعشع در ساعات دیگر عدد بالاتری نسبت به دو تاریخ دیگر است و نیروگاه می‌تواند میانگین توان بالاتری داشته باشد. این موضوع در شکل (۶) نیز نشان داده می‌شود.

براساس شکل (۶) میانگین توان ماکزیمم برای داده شهریور ۱۹/۱ کیلووات در طی یک روز می‌باشد که از دو تاریخ دیگر بیشتر است. داده دی‌ماه کمترین میانگین توان ماکزیمم را در یک روز به خود اختصاص می‌دهد که این مقدار میانگین توان برابر ۱۴/۲۵ کیلووات است. برای داده

سمنان) برای شهر سمنان در سه تاریخ مختلف در شکل (۴) نشان داده می‌شود. این تاریخ‌های شمسی (میلادی) به ترتیب ۱۳۸۳/۶/۱ (8/22/2004)، ۱۳۸۳/۱۰/۲۲ (1/11/2005) و ۱۳۸۴/۱/۱۰ (3/30/2005) است.



شکل (۴): تشعشع اندازه‌گیری شده در سه تاریخ برای شهر سمنان

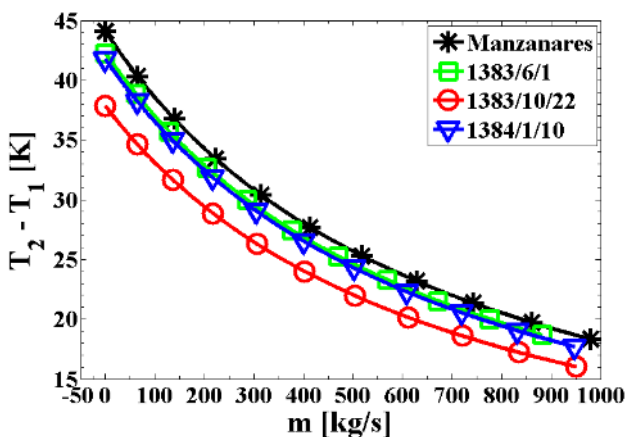
در این سه تاریخ، داده‌های تشعشع اندازه‌گیری شده و براساس شکل (۴)، مقدار تشعشع و ساعات آفتابی در روز اول شهریور نسبت به بیست و دوم دی و دهم فروردین بیشتر است. همچنین مقدار تشعشع و ساعات آفتابی برای روز اول شهریور و دهم فروردین به هم نزدیک‌تر است. بالاتر بودن مقدار تشعشع نشان می‌دهد که زاویه تابش خورشید بر سطح زمین به ۹۰ درجه (زاویه تابش عمود خورشید) نزدیک‌تر است. زاویه تابش ۹۰ درجه خورشید، بیشترین مقدار تشعشع را بر سطح زمین دارد. تعداد ساعات آفتابی بیشتر نیز بیان می‌کند که میزان انرژی بیشتری از خورشید به زمین می‌رسد. در سه تاریخ نامبرده، دما و فشار اندازه‌گیری شده [۲۷]، به صورت میانگین ماهیانه در جدول (۴) داده شده است. همچنین با توجه به شکل (۴)، در این جدول، تشعشع ماکزیمم که در محاسبات لحاظ گردیده است، داده می‌شود.

جدول (۴): داده‌های اندازه‌گیری شده در سه تاریخ برای شهر سمنان

مقادیر	پارامتر	تاریخ
۹۷۵/۵۸۳۴ W/m <sup>2</sup>	S تشعشع خورشید،	۱۳۸۳/۶/۱
۳۰۴/۵۵ K	T <sub>1</sub> دمای محیط،	
۸۸۳۳۰ Pa	P <sub>1</sub> فشار محیط،	
۸۷۲/۳۳۳۳ W/m <sup>2</sup>	S تشعشع خورشید،	۱۳۸۳/۱۰/۲۲
۲۷۶/۸۵ K	T <sub>1</sub> دمای محیط،	
۸۸۹۷۰ Pa	P <sub>1</sub> فشار محیط،	
۹۶۳/۱۰۹۹ W/m <sup>2</sup>	S تشعشع خورشید،	۱۳۸۴/۱/۱۰
۲۸۵/۷۵ K	T <sub>1</sub> دمای محیط،	
۸۸۶۰۰ Pa	P <sub>1</sub> فشار محیط،	

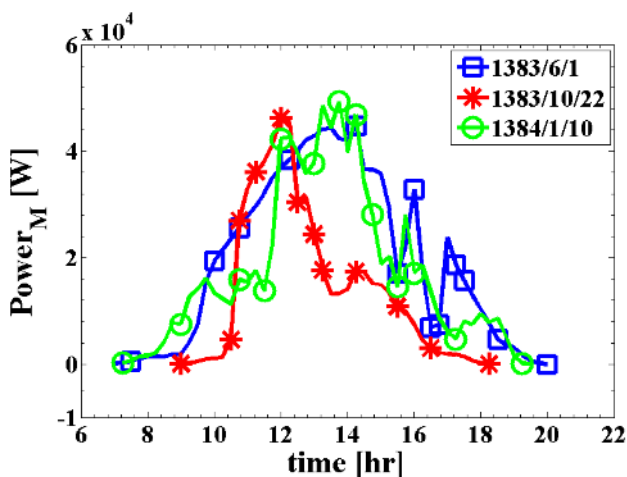
مانزانارس و سپس داده‌های شهر یور بیشترین تشعشع را دارند.

در شکل (۹) توان ماکزیمم در طی یک روز برحسب دبی، برای شهر سمنان، در تاریخ فروردین نشان داده می‌شود، در این شکل برای هر تشعشع در طی یک روز براساس شکل (۴)، ماکزیمم توان و دبی مربوط به آن مشخص می‌شود. با توجه به شکل (۹) در تشعشع ماکزیمم، دبی بهینه برای توان ماکزیمم، ۴۹۰ کیلوگرم بر ثانیه است. همچنین در این دبی راندمان کلکتور تقریباً ۰/۳ می‌باشد.

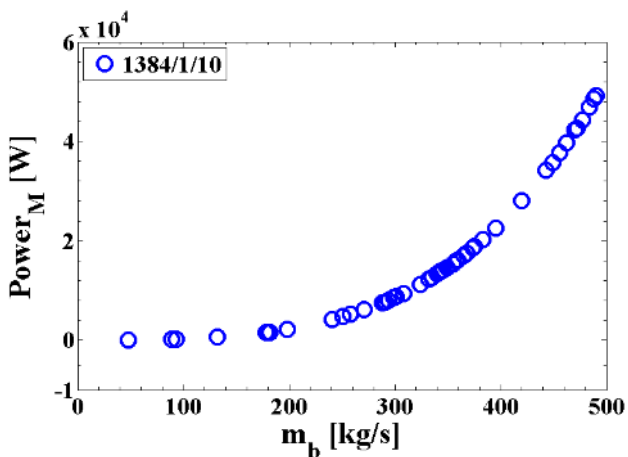


شکل (۸): اختلاف دما در نیروگاه برحسب دبی برای داده مانزانارس و سه تاریخ شهر سمنان

مانزانارس و سه تاریخ شهر سمنان، نسبت فشار بر حسب توان در شکل (۷) نشان داده می‌شود. هرچه توان نیروگاه بیشتر باشد، یعنی توربین توان بیشتری را تولید می‌کند، در نتیجه اختلاف فشار توربین به اختلاف فشار کل نزدیک‌تر می‌شود. برای نیروگاه، نسبت فشار بهینه، برای توان ماکزیمم تعریف می‌شود. براساس شکل (۷) نسبت فشار بهینه تقریباً برابر ۰/۸ است. این مقدار در محدوده ارائه شده در مجلات قرار دارد که محدوده ارائه شده برای نسبت فشار بهینه، بین ۰/۶۶۶ تا ۰/۹۷ می‌باشد.

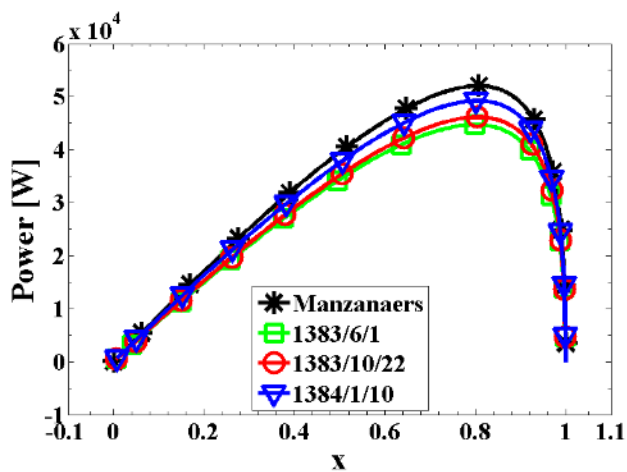


شکل (۶): توان ماکزیمم نیروگاه در ساعات مختلف روز برای سه تاریخ شهر سمنان



شکل (۹): توان ماکزیمم نیروگاه در ساعات مختلف روز برحسب دبی

در شکل (۱۰)، تغییرات توان ماکزیمم در بیشترین تشعشع در تاریخ فروردین، بر حسب دمای ورودی، برای شهر سمنان نشان داده می‌شود. تغییرات دمایی میانگین برای شهر سمنان به‌عنوان بازه دمای ورودی انتخاب می‌شود. براساس این شکل با افزایش دمای ورودی کلکتور، توان ماکزیمم کاهش می‌یابد. دلیل کاهش توان، کاهش نیروی شناوری



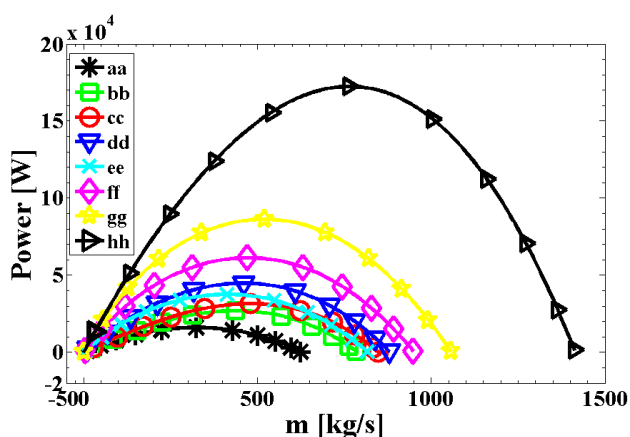
شکل (۷): توان برحسب نسبت فشار برای داده‌های مانزانارس و سه تاریخ شهر سمنان

میزان اختلاف دما بر حسب دبی برای نیروگاه در چهار حالت، در شکل (۸) نشان داده می‌شود، این شکل نشان می‌دهد که اختلاف دما برای تاریخ شهر یور بعد از اختلاف دمای مانزانارس، از دو تاریخ دیگر بیشتر است که دلیل آن، میزان تشعشع منتقل شده به کلکتور است. داده

۱۲۲ متر و ارتفاع دودکش ۱۹۴/۶ متر توان ماکزیمم نیروگاه عددی بزرگتر نسبت به شعاع کلکتور ۳۰۰ متر و ارتفاع دودکش ۱۰۰ متر است. همچنین در شعاع ثابت کلکتور، با افزایش ارتفاع دودکش، توان ماکزیمم افزایش می‌یابد. در این حالت، افزایش توان ماکزیمم، حساسیت بیشتری نسبت به افزایش ارتفاع از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) در حالت hh با تغییر همزمان شعاع کلکتور و ارتفاع دودکش، توان ماکزیمم تقریباً به ۱۷۲ کیلووات نیز می‌رسد.

جدول (۶): ابعاد متغیر در حالت‌های مختلف برای داده‌های تاریخ شهریور (شعاع دودکش و ارتفاع ورودی کلکتور ثابت)

حالت	ابعاد	حالت	ابعاد
aa	$h_c = 100 \quad r_f = 100$	ee	$h_c = 200 \quad r_f = 100$
bb	$h_c = 100 \quad r_f = 200$	ff	$h_c = 300 \quad r_f = 100$
cc	$h_c = 100 \quad r_f = 300$	gg	$h_c = 400 \quad r_f = 100$
dd	$h_c = 194/6 \quad r_f = 122$	hh	$h_c = 400 \quad r_f = 200$



شکل (۱۱): نمودار توان بر حسب دبی برای تاریخ شهریور در ابعاد مختلف (شعاع دودکش و ارتفاع ورودی کلکتور ثابت)

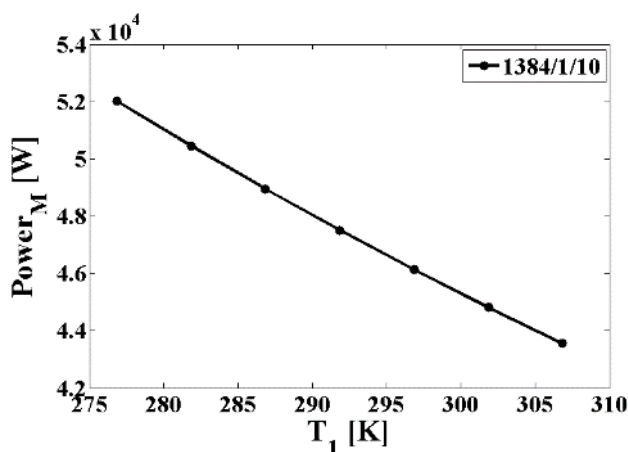
در شکل (۱۲) توان نیروگاه برای حالتی که ارتفاع دودکش و شعاع کلکتور ثابت فرض شده است (برابر ابعاد نیروگاه مانزانارس) و ارتفاع ورودی کلکتور و شعاع دودکش ابعاد متغیرند، نشان داده می‌شود. براساس شکل (۱۲) با افزایش ارتفاع ورودی کلکتور و شعاع دودکش توان ماکزیمم افزایش می‌یابد، اما با توجه به شکل (۱۱) و شکل (۱۲)، تأثیر ارتفاع دودکش و شعاع کلکتور بر توان نیروگاه، از سایر ابعاد هندسی بیشتر است.

می‌باشد. براساس تقریب بوزینسک (رابطه ۴۶)، نیروی شناوری برای هوا به تغییرات چگالی وابسته است.

$$(\rho - \rho_1)g = -\rho_1\beta(T - T_1)g \quad (46)$$

با افزایش دمای ورودی ( $T_1$ )، ضریب انبساط حرارتی و چگالی هوا کاهش می‌یابد که باعث کاهش نیروی شناوری می‌شود. همچنین دبی جرمی نیز با کاهش توان کاهش می‌یابد.

در جدول (۵) دمای سطح زمین زیر کلکتور و دمای سقف کلکتور، در خروجی کلکتور بیان می‌شود. دماس سطوح با تشعشع، رابطه مستقیم دارند. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) توان، برای تاریخ شهریور در ابعاد مختلف نشان داده می‌شود و تأثیر ابعاد نیروگاه بر توان بیان می‌گردد. این ابعاد برای شکل (۱۱) در جدول (۶) و برای شکل (۱۲) در جدول (۷) داده شده است.



شکل (۱۰): توان ماکزیمم بر حسب دمای ورودی کلکتور

جدول (۵): دما برای نیروگاه در سه تاریخ شهر سمنان

T_c (K)	T_e (K)	T_f (K)	S <sub>Max</sub> (W/m <sup>2</sup> )	تاریخ
۳۳۹/۵۱	۳۶۵/۹۱	۳۳۰/۰۲	۹۷۵/۵۸۳۴	۱۳۸۳/۶/۱
۳۰۶/۱۴	۳۳۱/۴۶	۲۹۹/۰۲	۸۷۲/۷۳۴۳	۱۳۸۳/۱۰/۲۲
۳۱۸/۷۱	۳۴۵/۲۵	۳۱۰/۲۶	۹۶۳/۱۰۹۹	۱۳۸۴/۱/۱۰

با توجه به شکل (۱۱) در ارتفاع دودکش ثابت با افزایش شعاع کلکتور، توان ماکزیمم برای نیروگاه افزایش می‌یابد، اما در شکل (۱۱) و با توجه به نمودار dd آن، که برای ابعاد مانزانارس می‌باشد، توان ماکزیمم برای ابعاد مانزانارس از حالت cc بیشتر است، یعنی ارتفاع دودکش نیز بر توان نیروگاه تأثیر مهمی دارد، به طوری که با شعاع کلکتور

## ۸۱ مدل‌سازی ریاضی نیروگاه دودکش خورشیدی برای وضعیت...

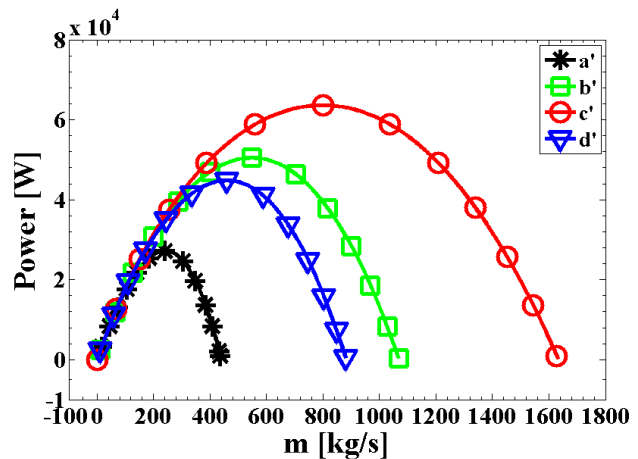
بررسی و همچنین تأثیر ابعاد نیروگاه بر توان خروجی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که توان در وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان در سه تاریخ بررسی شده کمتر از توان نیروگاه مانزانارس است. توان ماکزیمم برای شهر سمنان در سه تاریخ مختلف تقریباً بین ۵/۷٪ تا ۱۳/۴٪ کمتر از توان ماکزیمم نیروگاه مانزانارس در تاریخ ذکر شده به دست می‌آید. میزان توان در طول روز برای شهر سمنان نیز اندازه‌گیری شده است. با وجود اینکه میزان توان تولیدی در شهر سمنان از داده نیروگاه مانزانارس کوچک‌تر است، این اختلاف کم می‌باشد و با توجه به شدت تشعشع مناسب در شهر سمنان، نیروگاه دودکش خورشیدی می‌تواند توان قابل توجهی را تولید کند، در نتیجه وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان برای استفاده از نیروگاه دودکش خورشیدی مناسب است. با توجه به نتایج، با افزایش دمای ورودی در کلکتور، توان نیروگاه همچنین دبی کاهش می‌یابد. نرخ کاهش توان به ازای هر ۵ درجه افزایش دما تقریباً برابر ۳ درصد است. اختلاف دمای سطح زمین زیر کلکتور، در خروجی کلکتور، نسبت به دمای ورودی کلکتور، به ۶۱ کلوین نیز می‌رسد که این مقدار به تشعشع ورودی حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. براساس نتایج، ابعاد نیروگاه نیز بر توان آن تأثیرگذار است. با افزایش ابعاد، توان نیروگاه افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ارتفاع دودکش، تأثیر بیشتری نسبت به افزایش شعاع کلکتور بر توان خروجی دارد.

### تشکر و قدردانی

در این مطالعه، داده‌های تشعشع برای شهر سمنان، توسط شرکت سولارکار شهرک صنعتی سمنان اندازه‌گیری شده است، لذا از مدیرعامل محترم شرکت، جناب آقای مهندس اصفهانی و همکارانشان در شرکت سولارکار، کمال تشکر و قدردانی را دارد.

جدول (۷): ابعاد متغیر در حالت‌های مختلف برای داده‌های تاریخ شهریور (شعاع کلکتور و ارتفاع دودکش ثابت)

ابعاد	حالت
$h_f = 1 \quad r_c = 4$	a'
$h_f = 2 \quad r_c = 6$	b'
$h_f = 3 \quad r_c = 7$	c'
$h_f = 1/85 \quad r_c = 5/08$	d'



شکل (۱۲): نمودار توان بر حسب نسبت فشار برای تاریخ شهریور در ابعاد مختلف (شعاع کلکتور و ارتفاع دودکش ثابت)

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از یک مدل ریاضی، بررسی جامع از نیروگاه دودکش خورشیدی در شهر سمنان صورت می‌گیرد. میزان توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی در وضعیت آب‌وهوایی شهر سمنان در سه تاریخ مختلف ارزیابی شده است. در این ارزیابی، ابعاد نیروگاه مانزانارس لحاظ می‌گردد. افت فشار بهینه و افزایش دما در کلکتور به دست آمده است. تأثیر دمای ورودی کلکتور بر میزان توان تولیدی

### مراجع

- [1] Dhahri, A., Omri, A., "A Review of Solar Chimney Power Generation Technology", Int. J. Eng. Adv. Technol, Vol. 2, No. 3, pp. 1-17, 2013.
- [2] Schlaich, J., *The Solar Chimney-Electricity from the Sun*, Edition Axel Menges, Stuttgart, Germany, 1995.
- [3] Schlaich, J., Bergemann, R., Schiel, W., Weinrebe, G., "Sustainable Electricity Generation with Solar Updraft Towers", Structural Engineering International, Vol. 14, No. 3, pp. 225-229, 2004.
- [4] Fluri, T.P., Pretorius, J.P., VanDyk, C., Von Backström, T.W., Kröger, D.G., Van Zijl, G.P.A.G., "Cost Analysis of Solar Chimney Power Plants", Solar Energy, Vol. 83, No. 2, pp. 246-256, 2009.
- [5] Patel, S.K., Prasad, D., Ahmed, M.R., "Computational

- Studies on the Effect of Geometric Parameters on the Performance of a Solar Chimney Power Plant*", Energy Conversion and Management, Vol. 77, pp. 424-431, 2014.
- [6] Gholamalizadeh, E., Kim, M.H., "Three-dimensional CFD Analysis for Simulating the Greenhouse Effect in Solar Chimney Power Plants Using a Two-Band Radiation Model", Renewable Energy, Vol. 63, pp. 498-506, 2014.
- [7] Guo, P., Li, J., Wang, Y., Liu, Y., "Numerical Analysis of the Optimal Turbine Pressure Drop Ratio in a Solar Chimney Power Plant", Solar Energy, Vol. 98, pp. 42-48, 2013.
- [8] Guo, P., Li, J., Wang, Y., Wang, Y., "Evaluation of the Optimal Turbine Pressure Drop Ratio for a Solar Chimney Power Plant", Energy Conversion and Management, Vol. 108, pp. 14-22, 2016.
- [9] Guo, P., Wang, Y., Li, J., Wang, Y., "Thermodynamic Analysis of a Solar Chimney Power Plant System with Soil Heat Storage", Applied Thermal Engineering, Vol. 100, pp. 1076-1084, 2016.
- [10] Chergui, T., Larbi, S., Bouhdjar, A., "Thermohydrodynamic Aspect Analysis of Flows in Solar Chimney Power Plants-a Case Study", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 5, pp. 1410-1418, 2010.
- [11] Ming, T., Wang, X., Richter, R.K., Liu, W., Wu, T., Pan, Y., "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, pp. 5567-5583, 2012.
- [12] Djimli, S., Chaker, A., "Numerical Study of the Solar Chimney Power Plant Performance in the Region of M'Sila-Algeria", Power (W), Vol. 1000, No. 12, 2014.
- [13] Cottam, P.J., Duffour, P., Lindstrand, P., Fromme, P., "Effect of Canopy Profile on Solar Thermal Chimney Performance", Solar Energy, Vol. 129, pp. 286-296, 2016.
- [14] Asnaghi, A., Ladjevardi, S.M., "Solar Chimney Power Plant Performance in Iran", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 5, pp. 3383-3390, 2012.
- [15] Sangi, R., "Performance Evaluation of Solar Chimney Power Plants in Iran", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 1, pp. 704-710, 2012.
- [16] Maia, C.B., Castro Silva, J.O., Cabezas-Gómez, L., Hanriot, S.M., Ferreira, A.G., "Energy and Exergy Analysis of the Airflow Inside a Solar Chimney", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 350-361, 2013.
- [17] Petela, R., "Thermodynamic Study of a Simplified Model of the Solar Chimney Power Plant", Solar Energy, Vol. 83, No. 1, pp. 94-107, 2009.
- [18] Hamdan, M.O., *Experimental Solar Chimney Data with Analytical Model Prediction*, June 2014, [http://ases.conferenceservices.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012\\_0148\\_full%20paper.pdf](http://ases.conferenceservices.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0148_full%20paper.pdf).
- [19] Sakir, M.T., Piash, M.B.K., Akhter, M.S., "Design, Construction and Performance Test of a Small Solar Chimney Power Plant", Global Journal of Research and Engineering-GJRE-A, Vol. 14, No. 1, 2014.
- [20] Rashid, F. L., Hussein, E.Q., Azziz, H.N., "Design of Solar Chimney with Spherical Collector for Electricity Production", pp. 101-109, 2015.
- [21] Nasirivatan, S., Kasaeian, A., Ghalamchi, M., Ghalamchi, M., "Performance Optimization of Solar Chimney Power Plant Using Electric/Corona Wind", Journal of Electrostatics, Vol. 78, pp. 22-30, 2015.
- [22] Koonsrisuk, A., "Mathematical Modeling of Sloped Solar Chimney Power Plants", Energy, Vol. 47, No. 1, pp. 582-589, 2012.
- [23] Koonsrisuk, A., Chitsomboon, T., "Mathematical Modeling of Solar Chimney Power Plants", Energy, Vol. 5, pp. 314-322, 2013.
- [24] Duffie, J., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edn. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [25] Pastohr, H., Kornadt, O., Gürlebeck, K., "Numerical and Analytical Calculations of the Temperature and Flow Field in the Upwind Power Plant", International Journal of Energy Research, Vol. 28, No. 6, pp. 495-510, 2004.
- [26] Weinrebe, G., Schiel, W., *Up-Draught Solar Tower and Down-Draught Energy Tower e a Comparison*. Proceedings of the ISES solar World Congress, Adelaide, Australia, 2001.
- [۲۷] اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری (۱۳۹۴) آمار ۱۶۶

۸۳ مدل‌سازی ریاضی نیروگاه دودکش خورشیدی برای وضعیت...

ایستگاه سینوپتیک کشور تا پایان سال ۲۰۱۰ میلادی + ۳۷ ایستگاه تا

پایان سال ۲۰۰۵، خرداد ۱۳۹۴،

<http://www.chaharmahalmet.ir/iranarchive.asp>.