

بررسی تأثیرات تغییر ارتفاع دودکش، در عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

علیرضا الهامی امیری*
استادیار، دپارتمان مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جلفا، جلفا، ایران
دانشجوی مهندسی، دپارتمان مکانیک، دانشگاه آزاد واحد جلفا، جلفا، ایران
بهنام نجار احمدی

چکیده

بدون شک تولید توان الکتریکی از انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از مهمترین و اساسی‌ترین روشها برای آینده نه چندان دور می‌باشد. نیروگاه دودکش خورشیدی یک فن آوری نسبتاً جدید برای تولید توان از انرژی خورشید می‌باشد. نیروگاه دودکش خورشیدی یک نیروگاه حرارتی ساده است، که قابلیت تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی حرارتی در کلکتور و تبدیل آن به انرژی مکانیکی در توربین را دارد. انرژی تابشی رسیده به کلکتور و تبدیل آن به انرژی حرارتی، موجب ایجاد جریان هوا در بخش کلکتور و دودکش می‌شود. گذر جریان هوا از توربین بادی واقع شده در ریشه دودکش، باعث چرخش توربین و در نتیجه تولید توان الکتریکی در ژنراتور می‌شود. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی به منظور طراحی یک نیروگاه در مقیاس کوچک می‌باشد که پس از اعتبار سنجی مدل ارائه شده با نمونه تجربی نیروگاه دودکش خورشیدی در مانزاناراس اسپانیا، اقدام به بررسی تأثیر ارتفاع دودکش بر عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع دودکش تأثیر مستقیم بر پارامترهای جریان گذاشته و بدیهی است که همه این عوامل تأثیر محسوسی بر میزان توان تولیدی توسط نیروگاه خواهد داشت. در نهایت پس از بررسی ۹ ارتفاع مختلف برای دودکش و با ثابت فرض کردن سایر پارامترهای هندسی، معادله‌ای جهت به دست آوردن توان سیستم با طراحی پارامتر ارتفاع دودکش ارائه شده است. کلمات کلیدی: دودکش خورشیدی، تأثیر ارتفاع دودکش، انرژی تجدید پذیر، مانزاناراس اسپانیا.

Investigation on the Effect of stack Height on Solar Chimney Power Plant Operation, Using CFD Method

A. R. Elhami Amiri

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Jolfa International Branch, Aras free trade & Industrial zone, Jolfa, Iran

B. Najjar Ahmadi

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Jolfa International Branch, Aras free trade & Industrial zone, Jolfa, Iran

Abstract

Without any doubt, energy production based on renewable energies is one of the most effective methods in the near future. Solar chimney power plant is a relative novel technology for electricity production from solar energy. The solar chimney power plant is a simple power plant which is capable of converting solar energy into thermal energy in the solar collector. In the second stage, the generated thermal energy is converted into kinetic energy in the chimney and ultimately into electric energy using a combination of a wind turbine and coupled generator. In this study, a 3D-numerical method is used to evaluating of Stack height on solar chimney power plant operation and then presenting a matched relation between height and power generation. The results show that the stack height has direct influence on flow field characteristics and then on the power output of power plant.

Key Words: Solar Chimney, Stack Height, Energy Storage, Manzanares Spain.

۱- مقدمه

نیز جهت جلوگیری از هدر رفت منابع زیر زمینی آب و جهت جلوگیری از آلودگی‌های زیست محیطی، راهی جز استفاده از انرژیهای پاک مانند انرژیهای نهفته در باد و نور خورشید برای ما باقی نمانده است. برای استفاده وسیع از انرژیهای تجدیدپذیر، حتی الامکان بایستی تکنولوژی‌های ارائه شده ساده، ارزان، و با قابلیت اعتماد و اطمینان بالایی باشند. نمونه‌ای از این فناوریهای تولید توان، دودکش خورشیدی می‌باشد. در این سیستم از خاصیت دودکش‌ها استفاده می‌شود. یک دودکش خورشیدی از سه قسمت عمده کلکتور^۱ یا جمع کننده،

انرژی از دیر باز برای جوامع بشری اهمیت ویژه‌ای داشته است. در جهان امروزی که تکنولوژی و پیشرفت صنعتی جایگاه نخست را در زندگی مادی انسان‌ها احراز نموده است، تولید و مصرف بهینه انرژی اهمیت زیادی پیدا می‌کند. یکی از مهمترین اهداف و الویت‌های هر صنعت، تولید بالا در کنار پایین آوردن هزینه‌های تولید و آلودگی‌های زیست محیطی می‌باشد. مواد اولیه، انرژی، نیروی انسانی و مسئله تعمیر و نگهداری تجهیزات، عمده‌ترین هزینه‌ها را تشکیل می‌دهند و آلودگی‌های زیست محیطی نیز رابطه مستقیمی با مسئله میزان مصرف آب و انرژی و نوع تکنولوژی بکار برده شده جهت تولید انرژی می‌باشد. از اینرو به نظر می‌رسد جهت حفظ منابع فسیلی برای نسل‌های آینده و

¹ collector

دودکشی^۱ که در مرکز کلکتور خورشیدی است و توربین بادی^۲ که معمولاً در پایه برج واقع شده است، تشکیل می‌شود. هوای گرم به علت ارتفاع زیاد برج با سرعت زیاد صعود کرده و باعث چرخیدن پروانه و ژنراتوری که در پایین برج نصب شده است می‌گردد. در ادامه به توضیح اختصاصی این روش جهت تولید انرژی پرداخته خواهد شد.

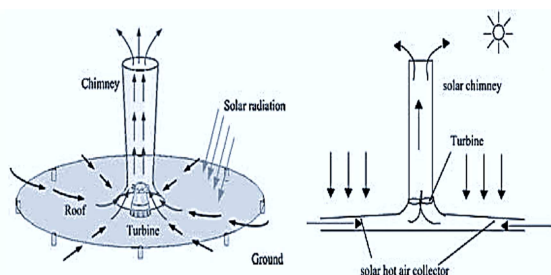
۱-۲- تاریخچه دودکش خورشیدی

در سال ۱۹۰۳ کابانیوس سرهنگ ارتش اسپانیایی در مجله La Energia Eléctrica برای اولین بار نیروگاه دودکش خورشیدی را معرفی کرد [۱]. پس از آن محققان زیادی در زمینه ساخت و تحلیل عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی قدمهای زیادی را برداشته و اختراعات مختلفی را به نام خود ثبت نموده اند [۱-۲۷]. در سال ۱۹۸۲ نیز یک نمونه آزمایشگاهی بزرگ در ۱۵۰ کیلومتری جنوب مادرید در منطقه مانزاناراس^۳ اسپانیا ساخته شد [۴]. بین سالهای ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۳ نتایج و ویژگیهای ساختاری حاصل از این نمونه تجربی توسط هاف و همکاران مورد ارزیابی قرار گرفته و در مجلات معتبر منتشر گردید [۶] و [۷]. در سال ۱۹۹۵ اشلاش مجدداً روی همان نیروگاه تحقیقاتی را انجام و نتایج آنرا در مقایسه با نتایج قبلی منتشر نمود [۸]. یک بخش از زیر کلکتور به عنوان گلخانه واقعی مورد استفاده واقع شده و در طول فعالیت سیستم از ۱۸۰ سنسور در داخل و خارج جهت اندازه‌گیری دما، رطوبت و سرعت باد استفاده شد [۹]. در ادامه در سال ۱۹۹۷، کریتر طرحی را برای قرار دادن کیسه‌های پر از آب در زیر سقف کلکتور ارائه کرد تا از این طریق انرژی تابشی خورشید در طول روز برای استفاده شبانه، ذخیره شود [۱۰]. گانون و همکاران در سال ۲۰۰۰، تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی برای عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی ارائه دادند. [۱۱]. در سال ۲۰۰۳ نیز روپرت و همکاران نتایج حاصل از محاسبات دینامیک سیالاتی و نیز طراحی توربین برای یک دودکش خورشیدی ۲۰۰ مگاواتی را منتشر کردند [۱۲]. در همین سال دوز سانتوز و همکاران تحلیلهای گرمایی و فنی حاصل از محاسبات حل شده به کمک کامپیوتر را ارائه کردند [۱۳]. کسانیان و همکاران هم در سال ۲۰۱۰ موفق به ساخت اولین دودکش خورشیدی در سطح آزمایشگاهی با ارتفاع برج ۱۳ متر و قطر کلکتور ۱۰ متر در دانشگاه زنجان شدند [۱۴]. با نگاهی به مطالعات گذشته مشاهده می‌شود که مطالعه‌ای منسجم که بتواند تأثیر ارتفاع دودکش بر عملکرد ترمودینامیکی و توان تولیدی نیروگاه دودکش خورشیدی مشخصی را به تصویر بکشد، صورت نگرفته است. در کار حاضر سعی بر این است که تصویر روشنی از اثر ارتفاع دودکش بر عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی مبتنی به روشهای عددی توسط نرم افزار Fluent ارایه شود و در نهایت رابطه‌ای جهت ارزیابی این اثر بر توان تولیدی تدوین گردد.

۱-۳- اصول کار

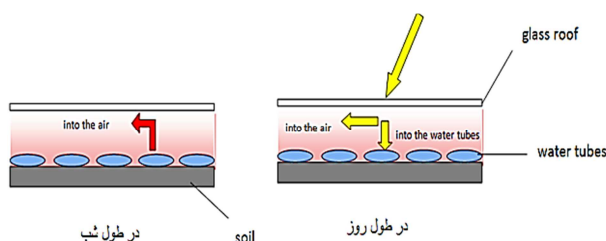
طبق طرحواره ارائه شده در شکل ۱ هوا در زیر یک سقف شفاف که تابش خورشیدی را از خود عبور می‌دهد گرم می‌شود. باید توجه داشت که وجود این سقف و زمین زیر آن به عنوان یک کلکتور یا جمع

کننده خورشیدی عمل می‌کند. در وسط این سقف دودکش یا برج عمودی وجود دارد که هوای زیادی از پایین آن وارد می‌شود. باید محل اتصال سقف شفاف و این برج به صورتی باشد که منفذی نداشته باشد و اصطلاحاً هوا بند شده باشد. روشن است که هوای گرم به دلیل داشتن چگالی کمتری نسبت به هوای سرد به سمت بالای برج حرکت خواهد کرد. در همین حال، بنا بر اصل پیوستگی، از قسمت انتهایی کلکتور هوای تازه وارد مجموعه خواهد شد.



شکل ۱- طرحواره نیروگاه دودکش خورشیدی

مطابق شکل ۲ جهت استفاده از این فناوری در طی ۲۴ ساعت، معمولاً از یک سری لوله یا کیسه‌های پر شده از آب استفاده می‌شود. بر این اساس در موقع روز، آب در داخل لوله‌ها گرم شده و با غروب آفتاب انرژی ذخیره شده را در هوای زیر کلکتور رها خواهد کرد. قابل ذکر است که لوله‌ها فقط یک بار برای همیشه پر می‌شوند و تنها در مواقع سرویس کلی مورد بازرسی قرار می‌گیرند. گرایان دمای ایجاد شده توسط کلکتور و جریان هوا در داخل دودکش موجب به حرکت در آمدن توربین واقع شده در پایه برج خواهد شد. این توربینها بیشتر از اینکه به توربینهای بادی شبیه باشند، به توربین‌های برق آبی شبیه‌اند که با استفاده از توربینهای محفظه دار، فشار استاتیک را به انرژی دورانی تبدیل می‌کنند. سرعت هوا در قبل و بعد از توربین یکسان است. توان قابل حصول در این سیستم متناسب با حاصل ضرب جریان حجم هوا در واحد زمان و اختلاف فشار در توربین می‌باشد.



شکل ۲- نحوه عملکرد کلکتور طی روز و شب

۱-۴- هدف از این مطالعه

در این پژوهش برای تولید توان از یک نیروگاه دودکش خورشیدی، رفتار ترمودینامیکی یک چرخه عملیاتی روزانه نیروگاه در شرایط پایا و با در نظر گرفتن تنها خاک به عنوان سیستم ذخیره ساز جهت مطالعه تأثیرات افزایش و کاهش ارتفاع دودکش در راندمان و عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین

^۱ solar chimney

^۲ wind turbine

^۳ Manzanar

جدول ۱- ابعاد هندسی ترسیم شده در نرم افزار Gambit جهت اعتبار سنجی نتایج

ابعاد [m]	پارامتر هندسی
۱۹۴٫۶	ارتفاع دودکش (H_T)
۵٫۰۸	شعاع دودکش (R_T)
۱٫۸۵	ارتفاع کلکتور (H_c)
۱۲۲	شعاع کلکتور (R_c)
۹	ارتفاع توربین از کف خاک (H_w)
۲	ارتفاع خاک شبیه سازی شده (H_s)
۰٫۰۶	ضخامت شیشه (t_g)

به منظور شبیه سازی سقف کلکتور شیشه ای از دیواره شرط استفاده شده که به صورت نیمه شفاف می باشد. قسمت فوقانی شیشه که با هوای اتمسفر احاطه شده توسط شرط مرزی مخلوط شبیه سازی شده است که در بخش بعد به طور کامل توضیح داده خواهد شد. طبق مراجع معتبر انتقال گرمای در خصوص جریان آزاد، مقدار ضریب انتقال گرمای همرفتی $h = ۸٫۵ \text{ W/m}^2 \text{ K}$ در نظر گرفته شد. در این کار دمای جریان آزاد در خارج از کلکتور به عنوان دمای محیط در ورودی تنظیم شده است. همچنین دمای تابش خارجی به عنوان دمای معادل آسمان از فرمول ۴ استفاده شده است.

$$T_{sky} = 0.055T_a^{1.5} \quad (۴)$$

توربین موجود در بدنه دودکش طبق توضیحات قبلی در ارتفاع ۹ متری از سطح خاک نصب شده است جهت شبیه سازی تأثیرات افت فشار توربین بر روی جریان از شرط مرزی دمنده به میزان افت فشار توربین استفاده شده است. دیوارهای دودکش نیز به صورت دیوار و عایق در نظر گرفته شدند. همچنین به دلیل نامتقارن بودن بردارهای تابش، از تحلیل مساله به صورت متقارن محوری پرهیز شده است و کل مسئله به صورت سه بعدی مورد بررسی واقع شده است.

۴- بررسی شرایط محیطی

در مطالعات هاف [۷]، مقادیر ضریب جذب^۱، انتقال^۲ و بازتابش^۳ برای پوشش کلکتور به ترتیب برابر ۵٪، ۷۹٪، ۱۶٪ و برای سطح لایه های زمین ۸۰٪، ۰٪، ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. در مطالعات هاف، بدلیل استفاده از پوشش قیر برای خاک، ضریب جذب خاک به ۹۱٪ رسیده است. در کار حاضر با فرض مخلوط شدن قیر با سایر مواد، این مقدار ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. طبق مطالعات هاف، به طور خلاصه تابش خورشیدی دریافت شده توسط پوشش کلکتور به ۳ بخش تقسیم می شود: بخش اول تابش توسط پوشش خود کلکتور جذب می شود (۵٪)، که $\frac{2}{3}$ از این مقدار به هوای بیرون و $\frac{1}{3}$ از این مقدار به هوای داخل کلکتور انتقال می یابد. بخش دوم از تابش خورشیدی که به زمین می رسد (۷۹٪)، فرض بر این می باشد که ۲۰٪ این مقدار منعکس خواهد شد. بخش سوم از تابش (۱۶٪ باقیمانده)، به هوای بیرون از کلکتور منعکس می شود. بر اساس نظریه هاف [۷]، $\frac{1}{3}$ از تابش

منظور پس از انتخاب یک مدل کوچک، به تغییر پارامتر ارتفاع دودکش با ثابت فرض کردن سایر پارامترهای هندسی و شرایط محیطی پرداخته شده است.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

جریان جابجایی آزاد با تغییرات دما سبب خواهد شد تا از معادلات مومنوم، پیوستگی و انرژی به صورت همزمان در شبیه سازی ها استفاده شود. با توجه به هندسه خاص مسئله، از معادلات جریان در سیستم استوانه ای استفاده خواهد شد [۲۸].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\rho u_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (۱)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۲)$$

معادلات مومنوم:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial r} \\ &+ \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] + \rho g_r \\ \rho \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_r u_\theta}{r} \right) &= - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ &+ \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] + \rho g_\theta \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial z} \\ &+ \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \end{aligned} \quad (۳)$$

۳- مدل فیزیکی و شرایط مرزی

در ابتدا برخی از شرایط مرزی و پارامترهای محیطی که شامل خواص خاک، هوا، میزان تابش خورشید و دمای محیط که در ۲ سپتامبر ۱۹۸۲ در نیروگاه مانزاناراس اسپانیا اندازه گیری شده ارائه شده است. در کار حاضر ابعاد نیروگاه مانزاناراس طبق جدول ۱ و شرایط مرزی طبق شکل ۳ اعمال شده است. جهت شبیه سازی خاک زیر کلکتور بنابر تحقیقاتی که نوفظیگر و همکاران در دپارتمان خاک دانشگاه اوکلاهما انجام داده است، دمای خاک پایین تر از عمق ۵ متر در هر شرایط محیطی ثابت باقی می ماند. اما به جهت جلوگیری از کثرت سلولهای محاسباتی و الگوگیری از کار هورتادو [۱۶]، در شبیه سازی منبع ذخیره گرمای نیروگاه عمق خاک ۲ متر در نظر گرفته شده است. جهت مرز ورودی شرایط مرزی فشار ورودی و جهت شرط مرزی خروجی نیز با توجه به فیزیک مساله، شرط مرزی فشار خروجی اعمال گردیده است.

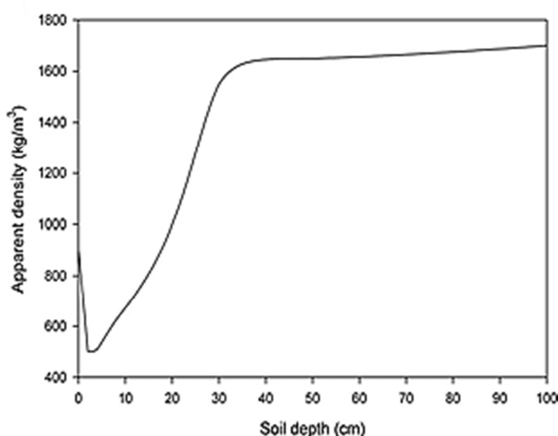
¹ absorptivity

² transmissivity

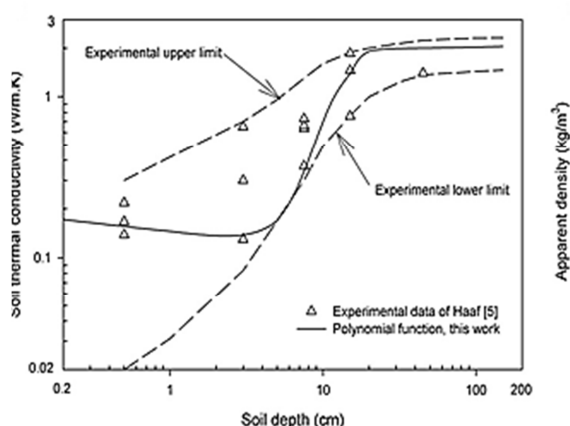
³ reflectivity

۵- مدل فیزیکی خاک

اینرسی حرارتی خاک به خاطر وجود گرادیان دما با آهنگ انتقال حرارت مرتبط است. بنابراین روشن است که پخشندگی گرمایی خاک $\alpha_s = \left(\frac{k}{\rho c_p}\right)_s$ یک نقش کلیدی در قوانین ایفا می‌کند. بدیهی است که تغییرات رسانایی گرمایی k_s ، گرمای ویژه ρ_s و گرمای ویژه C_{ps} باید با عمق خاک اندازه‌گیری شوند. نیروگاه مانزاناراس بر روی سنگ آهک بنا شده است. به علت طبقه بندی و اثر فشار لایه های بالایی، پارامترهای مختلفی از مشخصه های خاک از جمله اندازه دانه ها و فضای میانی آنها می تواند به طور قابل ملاحظه ای با عمق خاک تغییر کند. به این ترتیب لایه های سطحی خاک را می توان به عنوان یک ماده متخلخل با چگالی ظاهری و یا به صورت عمده در نظر گرفت. ρ_{as} کوچکتر از خود چگالی مواد تشکیل دهنده خاک یا همان ρ_s می باشد. انتظار می رود که ρ_{as} در عمقهای به اندازه کافی زیاد برابر ρ_s باشد. خواص خاک تا حد زیادی به عمق، ترکیب خاک، قرار گرفتن در معرض عوامل زیست محیطی و اثرات فعالیتهای انسانی وابسته است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب بیانگر چگالی ظاهری و رسانایی گرمایی خاک می باشند.

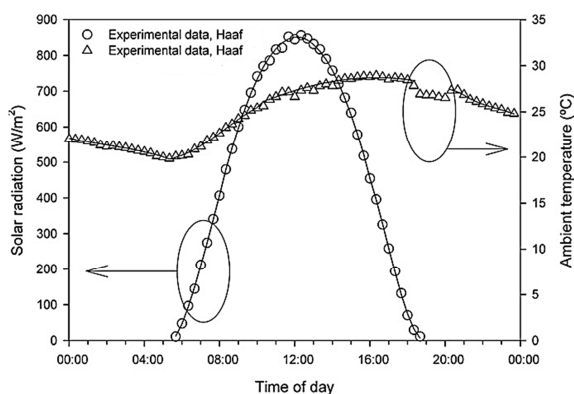


شکل ۵- تغییرات چگالی ظاهری خاک با عمق خاک [۱۶]



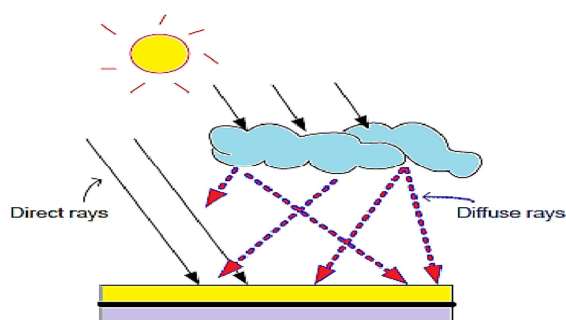
شکل ۶- تغییرات رسانایی گرمایی خاک با عمق خاک [۱۶]

موجهای بلندی که توسط لایه سطحی خاک منتشر می‌شوند را می‌توان به عنوان تلفات در نظر گرفت. در نهایت مقدار ۴۲٫۳٪ از کل تابش خورشید از سطح خاک به صورت همرفت به هوای زیر کلکتور و به صورت رسانش در خاک انتقال می‌یابد. این موضوع در کار حاضر لحاظ نشده و شبیه‌سازی تابش با در نظر گرفتن لایه شفاف بطور کامل صورت گرفته است. در مطالعات حاضر، دما و میزان تابش از شکل ۳ استخراج و در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- میزان تابش کل و دمای محیط در نظر گرفته شده در طول روز برای نیروگاه مانزاناراس [۱۶] (۲ سپتامبر ۱۹۸۲)

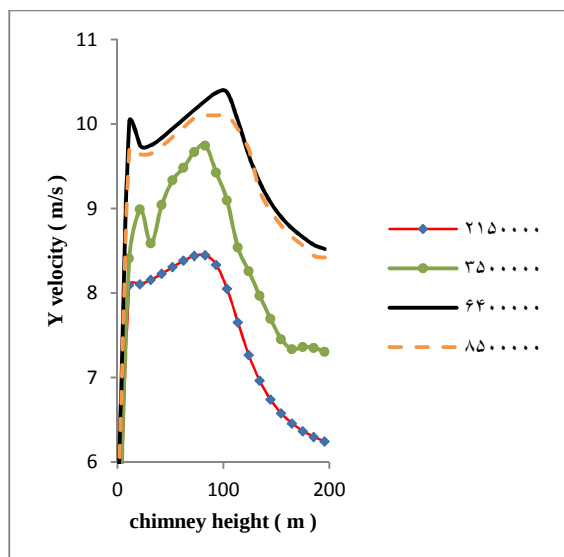
تابش خورشید حاصل از تابش الکترومغناطیس است که به صورت موج انتقال می‌یابد. قسمتی از تابش که بدون تفرق یا جذب به سطح زمین می‌رسد را تابش مستقیم^۱، و قسمتی از تابش خورشیدی که توسط اجزای جو جذب یا متفرق می‌شوند را تابش پخشی^۲ می‌نامند. مطابق شکل ۴ تابش مستقیم از خورشید به صورت مسیر مستقیم می‌آید، در حالی که تابش پراکنده در تمام جهات از آسمان به سطح زمین می‌رسد. در روزهای آفتابی ۱۵ درصد تابش خورشیدی به صورت پراکنده به زمین می‌رسد. اما در روزهای ابری این مقدار ممکن است به ۱۰۰ درصد کل تابش نیز برسد. در کار حاضر برای شبیه‌سازی تابش خورشید از مدل Solar Ray Tracing استفاده شده است. میزان تابش مستقیم از گزینه Solar Calculator و بر حسب طول و عرض جغرافیایی محل نیروگاه مانزاناراس و میزان تابش پخشی به صورت ثابت و ۴۸٫۵ درصد کل تابش در نظر گرفته شده است.



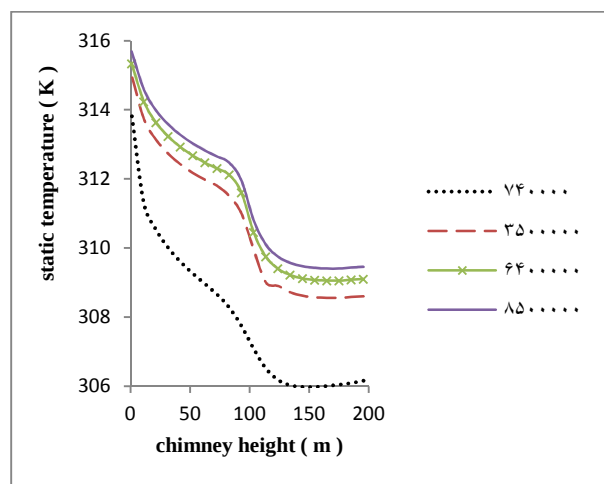
شکل ۴- شماتیک تفاوت تابش مستقیم با تابش دیفیوز

¹ Direct radiation
² Diffuse radiation

سرعت و دما در طول مرکز دودکش مورد ارزیابی قرار گرفت (اشکال ۷ و ۸). برای کوپل بین معادلات سرعت و فشار از الگوریتم simple c و برای جلوگیری از انتشار نتایج نادرست از حالت Body Force Weighted برای معادله فشار و از معادلات درجه دوم خطی برای سایر پارامترها استفاده گردید.



شکل ۷- تغییرات سرعت با تعداد سلول های متفاوت در مرکز دودکش



شکل ۸- تغییرات دما با تعداد سلول های متفاوت در مرکز دودکش

معیار همگرایی برای هر مرحله از حل برابر 10^{-5} $\left| \frac{\theta^{i+1} - \theta^i}{\theta^i} \right| \leq 10^{-5}$ می تواند هر متغیر وابسته ای باشد و $\bar{i}$ نشان دهنده تعداد تکرار است) در نظر گرفته شده است که در شکل ۹ همگرایی براساس مقادیر باقی مانده آرایه شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی اعمال شده برای مواد

شیشه	خاک	هوا	خاصیت
۲۲۲۵	UDF	Boussinesq ۱/۱۳۲۵	چگالی [kg/m ³]
۸۳۵	۸۴۰	۱۰۰۶	گرمايي ویژه [j/kg.k]
۱/۴	UDF	۰/۰۲۷۱	رسانايي گرمایی [w/m.k]
-	-	۱/۸۲۴e ^{-۵}	لزجت [kg/m.s]
-	-	۰/۰۰۳۲	ضريب انبساط گرمایی [1/k]

با توجه به هندسه مسئله فرض بر این است که جریان داخل دودکش متقارن می باشد. معادله انرژی نیز به منظور شبیه سازی انتقال گرمای رسانشی به خاک اضافه می شود. عدد بی بعدی که حاکم بر این مسئله است، عدد رایلی^۱ است. عدد رایلی عبارت است از:

$$Ra = Gr \times Pr \quad (5)$$

$$Gr = g\beta\Delta T \frac{H^3}{\nu^2} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\rho c_p}{k} \quad (7)$$

معمولاً این اعداد از 10^{10} شروع می شوند. بنابراین جریان سیال در داخل سیستم را باید آشفته در نظر گرفت. در کار حاضر به منظور شبیه سازی بهتر، از حالت RNG مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است. مقدار ضرایب ثابت برای مدل $k-\epsilon$ به صورت زیر انتخاب شده اند:

$$C_1 = 1.42, \quad C_2 = 1.68$$

در شبیه سازی ها، دمای محیط از شکل ۳، و مقادیر رسانایی گرمایی و چگالی ظاهری خاک از شکل های ۵ و ۶ بر حسب عمق خاک به دست می آیند. همین طور فشار محیط برابر فشار سطح دریای آزاد و ۱۰۱۳۲۵ پاسکال فرض شده است.

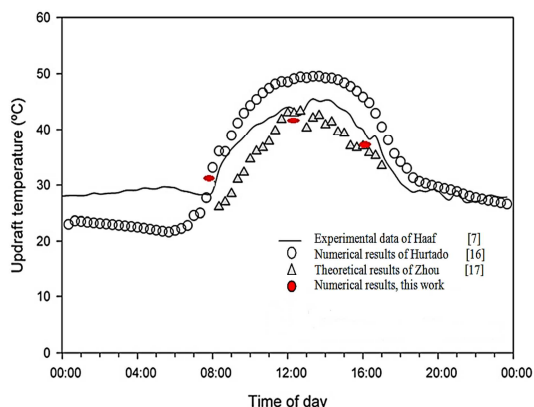
۶- شبیه سازی عددی

قبل از هر اقدامی، به منظور به دست آوردن تعداد و نوع المانهای حل عددی نتایج مورد بررسی واقع شد. به منظور به دست آوردن شبکه مناسب، مسئله توسط ۷۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ سلول گسسته^۲ شد، که پس از بررسی های به عمل آمده، شبکه مطلوب مسئله ۶۳۵۰۰۰ المان مکعبی تشخیص داده شد. جهت بررسی نتایج استقلال از شبکه،

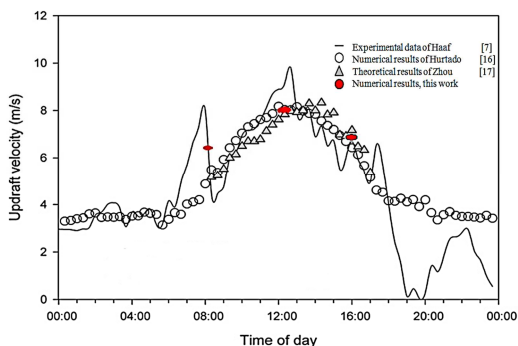
^۱ Rayleigh number

^۲ discretized

نتایج نمونه تجربی نیروگاه مانزاناراس که در سال ۱۹۸۴ توسط هاف و همکاران [۷] ارائه شده، نتایج نمونه تئوری که توسط زئو و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۹ ارائه شده و در نهایت نتایج نمونه ای عددی که توسط هورتادو و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۲ ارائه شده، استفاده شده است. به دلیل کثرت المان‌های شبکه اعتبار سنجی در ۳ نقطه از روز (۸ صبح، ۱۲ ظهر و ۱۶ بعد از ظهر) صورت پذیرفته است که در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) نتایج مقایسه‌ای آورده شده است. نتایج حاکی از تطابق مناسب داده‌های به دست آمده از کار حاضر با مراجع ذکر شده می‌باشد.



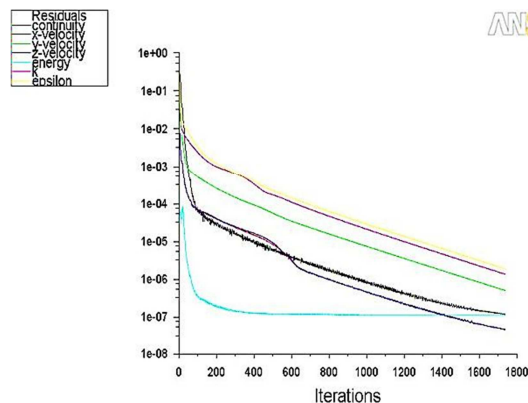
شکل ۱۱- نتایج دمای پای دودکش با کارهای تجربی، تحلیلی و عددی در ورودی توربین طی ۲۴ ساعت شبانه روز



شکل ۱۲- نتایج سرعت بالارونده در پای دودکش با کارهای تجربی، تحلیلی و عددی در ورودی توربین طی ۲۴ ساعت شبانه روز

خطای نتایج تجربی ناشی از کمبود دقت لازم در ابزارآلات اندازه گیری و همچنین خطای صرف نظر کردن از نیروهای پسا، برا و انتقال گرما از بدنه نیروگاه در حل عددی سبب گشته تا نتایج عددی با نتایج تجربی و تحلیلی اختلافی جزئی داشته باشند، که این اختلاف مرسوم بوده و زیر ۲۰ درصد معمولاً قابل قبول می‌باشد.

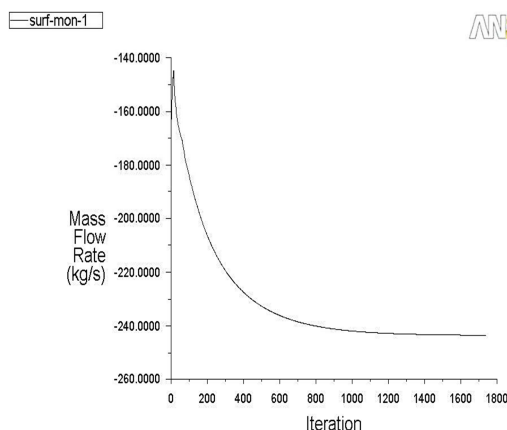
نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که دودکش بدون توربین دبی جرمی بیشتری از خود عبور می‌دهد. از آنجایی که افت فشار توربین باعث می‌شود سرعت هوای ایجاد شده کاهش یابد می‌توان از فرمول ۹ جهت به دست آوردن سرعت در پای دودکش استفاده نمود. این روابط عیناً از مرجع [۱۶] استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۹- تغییرات نمودارهای باقیمانده با تعداد تکرار

گاهی اوقات امکان دارد که شرط معیار همگرایی ارضا شده باشد در حالی که هنوز نمودارهای مونیتور شده مانند دبی جرمی خروجی به یک عدد ثابت نرسیده باشند. در این صورت باید تا زمانی که دبی جرمی ثابت شود حل عددی ادامه یابد شکل (۱۰). همچنین مواقعی رخ می‌دهد که با وجود ثابت شدن دبی جرمی، معیار همگرایی هنوز ارضا نشده است! در چنین مواقعی شرط میزان عدم تعادل خاص سنجیده شده و در صورت ارضای شرط کمتر از ۰.۲٪ حل عددی خاتمه می‌یابد.

$$\frac{\dot{\phi}_{net}}{\dot{\phi}_{outlet}} \times 100 \leq 0.2\% \quad (8)$$

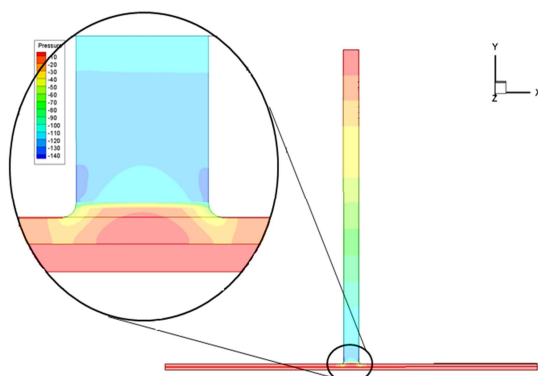


شکل ۱۰- تغییرات دبی جرمی خروجی با تعداد تکرار

نمودارهای نشان داده شده حاکی از همگرایی مطلوب حل عددی است.

۷- اعتبار سنجی

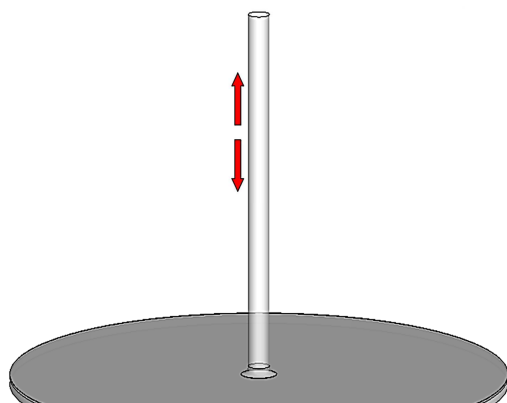
جهت اعتبار سنجی کار حاضر از ۳ کار تجربی، تحلیلی و عددی به شرح زیر استفاده شده است:



شکل ۱۵- کانتور فشار در صفحه $z=0$

۸- تغییرات ارتفاع در دودکش

طرحواره هندسه مورد مطالعه مطابق با شکل ۱۶ می باشد.



شکل ۱۶- طرحواره تغییرات هندسی در دودکش سیستم

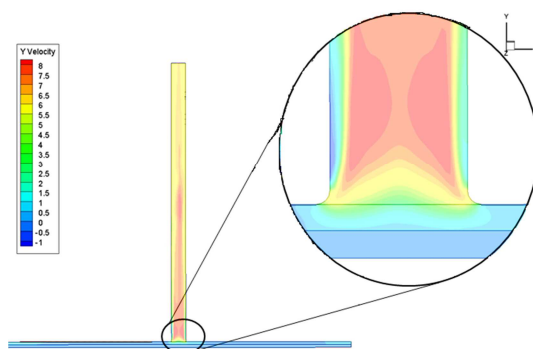
همان طور که قبلاً در فرمول ۱۱ اشاره شد با کاهش دمای استاتیکی سرعت جریان افزایش خواهد یافت. در نمودار ۱۷ که دمای استاتیکی را در مرکز دودکش نشان می دهد، مشاهده می شود که دودکش با ارتفاع بیشتر دمای خروجی کمتری نسبت به دودکش با ارتفاع کمتر دارد. به عنوان مثال دودکش با ارتفاع ۵۰ متر دمای خروجی ۳۰۹٫۲ کلوین را دارا می باشد، این در حالیست که دمای خروجی دودکش با ارتفاع ۱۵۰ متر به ۳۰۲ کلوین می رسد. به موجب این اختلاف دماست که اختلاف سرعت ۲٫۶ متر بر ثانیه ای بین دو دودکش به وجود می آید. در بخش کلکتور با پیشرفت به سمت مرکز کلکتور، بایستی دمای هوای جریان یافته به مرکز کلکتور افزایش یابد. شکل ۱۹ موید این مساله است که دمای کلکتور از ۲۹۸ کلوین در ورود به آن، به رقمی بین ۳۰۰ تا ۳۰۵ کلوین در نزدیکی مرکز آن افزایش پیدا می کند. به دلیل دبی جرمی زیاد و سرعت زیاد جریان هوا در دودکش با ارتفاع بیشتر، انتظار می رود سرعت جریان و دبی جریان در کلکتور هم افزایش پیدا کند. فلذا در نیروگاه با دودکش مرتفع، به دلیل زمان ماند کمتر توده های هوا در کلکتور، و زیاد بودن دبی در کلکتور، روند افزایش دما از ورود تا مرکز کلکتور، با شیب ملایمتری صورت گیرد که نتایج شبیه سازی ها در شکل ۱۸ این موضوع را تأیید می کند. بخشی از جهش ناگهانی دما در مرکز کلکتور ناشی از تبدیل دمای استاتیکی به دمای سکون در اثر وجود سرعت تقریباً صفر در

$$U_B = \sqrt{\left[2 \frac{(1-f)(\Delta p)_T}{\rho_B}\right]} \quad (9)$$

$$N_W = \eta_W \frac{2}{3} (\Delta P)_T U_B (\pi R_T^2) \quad (10)$$

به منظور مقایسه نتایج در مدل ها، معادلات برای ساعت ۱۲ ظهر در حالت پایا و همان محل نیروگاه مانژانارس تنظیم شده است. در اشکال ۱۳ تا ۱۵ کانتورهای سرعت، دما و فشار در صفحه $z=0$ و در ریشه دودکش نمایش داده شده است.

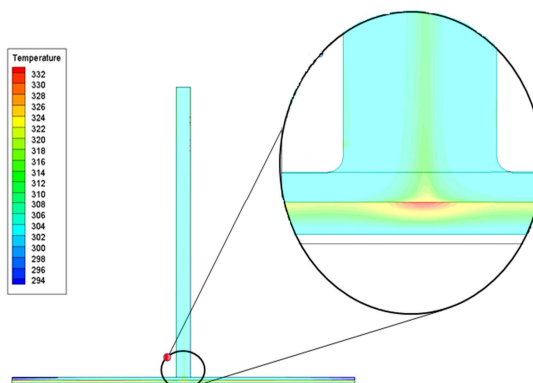
سرعت V_x در ورودی کلکتور صفر می باشد. این سرعت با پیشرفت به سمت مرکز کلکتور افزایش می یابد و در پای دودکش سرعت V_x با تغییر جهت جریان به V_y تبدیل شده و V_x تماماً صفر خواهد شد. با توجه به فرمول ۱۱ و کاهش سرعت در جهت x ، T_{sta} (دمای استاتیکی) باید به سمت دمای سکون میل نماید. بنابراین در مرکز کلکتور یک پیک دمایی تشکیل خواهد شد. نقطه ای که در آن پیک دمایی رخ می دهد، تقریباً به مانند یک نقطه تکین می باشد. در واقعیت کار، به دلیل نامتقارن بودن خطوط جریان چنین نقطه ای وجود ندارد.



شکل ۱۳- کانتور سرعت بالا رونده در صفحه $z=0$

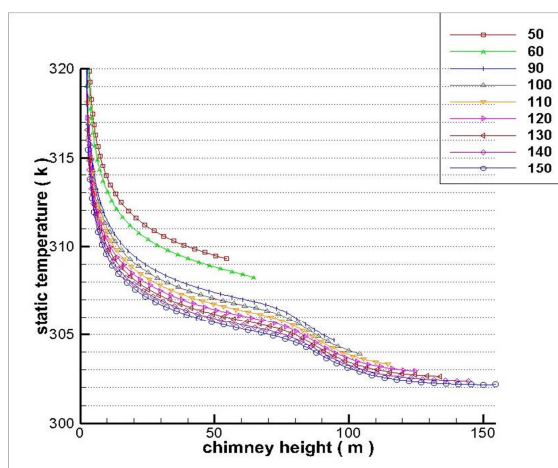
به موجب مکش دودکش فشار در داخل سیستم کمتر از فشار جو بوده و منفی است. با افزایش ارتفاع دودکش میزان فشار داخل سیستم به فشار جو نزدیک شده و رفته رفته فشار نسبی صفر می شود. تأثیرات افت فشار توربین بر روی جریان به وضوح در شکل ۱۵ قابل مشاهده است.

$$T_{sta} + \frac{1}{2c_p} V^2 = T_{stagnation} \quad (11)$$

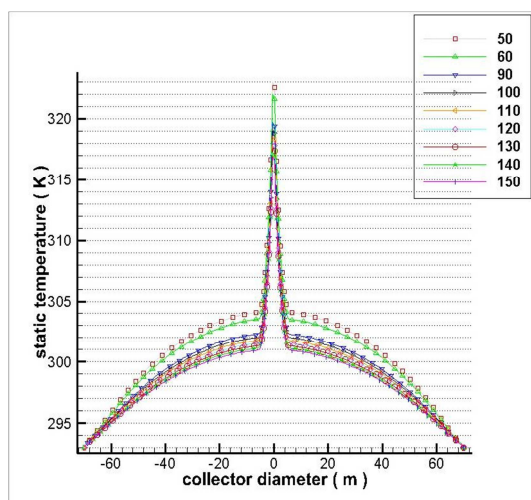


شکل ۱۴- کانتور دمای استاتیکی در صفحه $z=0$

همان طور که در نمودار ۲۲ مشاهده می‌شود شیب نمودارهای قبل از ارتفاع ۹ متر بسیار بیشتر از شیب سایر نقاط در دودکش می‌باشد. دلیل این امر تغییر ناگهانی مسیر جریان از حالت افقی به حالت عمودی است. جریان پس از طی مسیری در داخل دودکش یکنواخت تر شده و کلیه سرعت های V_x و V_z به سرعت V_y تبدیل خواهد شد و پس از آن سرعت جریان با شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد. نتایج ارایه شده در شکل ۲۳ هم نشان می‌دهد که پروفیل سرعت جریان در هر مقطع از دودکش مرتفع، در یک سطح بالاتری نسبت به سرعت جریان در دودکشی‌های کوتاه‌تر قرار دارد. گذر جرمی در لایه‌های پایین کلکتور کمتر از لایه‌های فوقانی است. فلذا دلیل پایین بودن سرعت جریان در مرکز دودکش و آنهم در ریشه دودکش (در یک ارتفاع دودکش مشخص) به پایین بودن گذر جرمی در این نقطه به دلیل تغییر جهت خطوط جریان از حالت افقی به عمودی بر می‌گردد. شکل ۲۴، دبی گذری از دودکش های مختلف را نشان می‌دهد. طبق تحلیل‌های ارایه شده در قبل، انتظار می‌رود دبی گذری از دودکش مرتفع بیشتر از دودکش با ارتفاع کوتاه‌تر باشد.

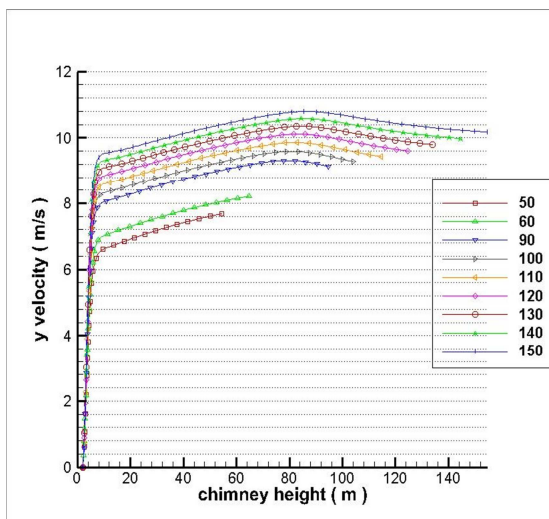


شکل ۱۷- تغییرات دمای استاتیکی در مرکز دودکش نسبت به ارتفاع دودکش به ازای ارتفاع دودکش متفاوت

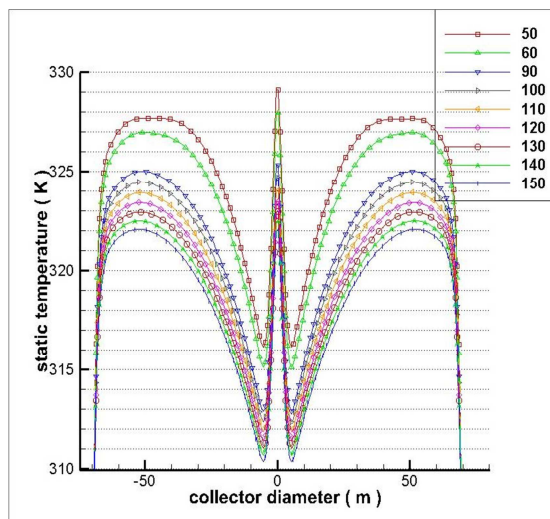


شکل ۱۸- تغییرات دمای استاتیکی هوای کلکتور نسبت به شعاع کلکتور در ارتفاع ۰٫۳ متر از کف خاک به ازای ارتفاع دودکش متفاوت

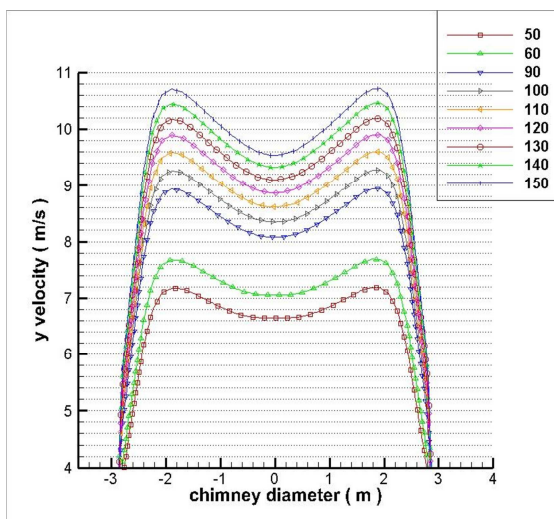
مرکز کلکتور به دلیل تغییر ناگهانی مسیر جریان و بالا بودن دمای خاک در مرکز کلکتور می‌باشد که شاید تجربه واقعی این موضوع در دنیای حقیقی، به دلیل عدم تقارن در هندسه و سایر عوامل محیطی، به این مفهوم وجود نداشته باشد. شکل ۱۹ تغییرات دمایی خاک در عمق ۳۰ سانتی متری را نشان می‌دهد. منحنی‌های دما پایین متعلق به نیروگاه با ارتفاع بیشتر و منحنی‌های دما بالا متعلق به نیروگاه با ارتفاع دودکش کمتر می‌باشند. دبی جریان در نیروگاه با دودکش بلند تر، بیشتر است. فلذا به لحاظ افزایش ضریب همرفتی هوا انتظار می‌رود انتقال گرما بیشتری در کلکتور از سطح خاک به هوای داخل کلکتور صورت پذیرد. پس دمای سطح خاک در هر شعاعی از کلکتور این نیروگاه کمتر از نیروگاه با دودکش کوتاه‌تر خواهد بود. البته این موضوع به لحاظ افزایش دبی جریان، به مفهوم بالاتر بودن دمای هوا نخواهد بود که توجیه آن قبلاً آورده شده است. افزایش ناگهانی دما در مرکزیت خاک نیز به دلیل عدم وجود جریان و عدم انتقال گرما در آن نقطه می‌باشد. اما بررسی تغییرات دمایی خاک در یک نیروگاه مفروض، نشان می‌دهد که در ابتدای کلکتور، دمای خاک روندی افزایشی داشته و پس از رسیدن به یک اوج دمایی در ۵۰ متری از مرکز کلکتور، روند کاهشی را تا نزدیکی مرکز کلکتور طی می‌کند. در ابتدای کلکتور، شار گرمایی همرفت از خاک سرد (که هنوز تابش خورشیدی را در داخل کلکتور جذب نکرده) به هوای سرد همدم با خاک (که در حال ورود به کلکتور است) بسیار کم است. اما جذب گرما خورشیدی توسط خاک در قسمتهای ابتدایی کلکتور، به مراتب از پس دادن آن به هوا توسط همرفت به لحاظ بالا بودن ضریب ذخیره گرمایی خاک و پایین بودن اختلاف دما بین خاک و هوا بیشتر است. اما پس از شعاع ۵۰ متری، روند معکوسی مشاهده میشود. از این نقطه به بعد، به لحاظ افزایش اختلاف دما، میزان شار گرمایی همرفتی از خاک به هوا روند افزایشی را نسبت به میزان جذب حرارت خورشیدی توسط خاک پیدا می‌کند. فلذا انتظار می‌رود دمای خاک پس از تجربه یک نقطه ماکزیمم، روند کاهشی داشته باشد. شکل ۲۰ تغییرات دما در قطر دودکش را نشان می‌دهد. بدیهی است که در مناطق نزدیک سطح خاک در کلکتور دمای هوا بیشتر از سطوح بالاتر از سطح خاک است. فلذا با توجه به اصول حاکم بر خطوط جریان و تغییر مسیر افقی در کلکتور به مسیر عمودی در دودکش، انتظار می‌رود تا دمای هوا در مرکز دودکش بیشتر از سایر مناطق باشد. طبق توضیحاتی که در خصوص شکل ۱۹ ارایه شد، پروفیل دما در دودکش با ارتفاع کمتر، درجات بالاتری از پروفیل دما با ارتفاع بیشتر را خواهد داشت. به دلیل عایق فرض کردن بدنه، و نیز بنابر اصل پذیرش جدار که در آن سرعت در نزدیکی بدنه به سمت صفر میل خواهد می‌کند، انتظار داریم دمای استاتیکی هم به دمای سکون نزدیکتر شود. در خصوص نتایج ارایه شده در شکل ۲۱ باید به این نکته اشاره کرد که بطور کلی به دلیل افزایش دمای هوا در کلکتور از ورود تا مرکز آن، چگالی هوا کاهش پیدا می‌کند. بنابراین انتظار می‌رود به سبب ثابت بودن دبی جرمی، سرعت افزایش یابد. این موضوع در این شکل به وضوح در تمامی نیروگاه‌ها دیده می‌شود. اما با نگاهی دوباره به منحنی، ملاحظه می‌شود که سرعت جریان در هر نقطه از کلکتور در نیروگاه با دودکش مرتفع، بیشتر از سایر موارد است. شکل ۲۲ هم نشان می‌دهد که سرعت جریان در دودکش بلندتر نسبت به سرعت جریان با دودکش کوتاه تر (در نقاط متناظر) بیشتر است.



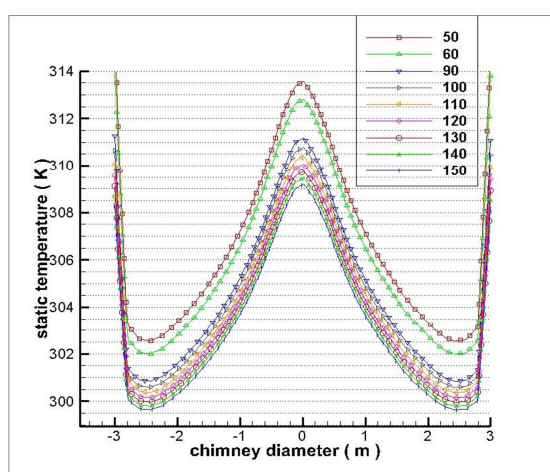
شکل ۱۹- تغییرات دمای استاتیکی داخل خاک نسبت به شعاع کلکتور در عمق ۰٫۳ متر زیر کف کلکتور به ازای ارتفاع دودکش متفاوت



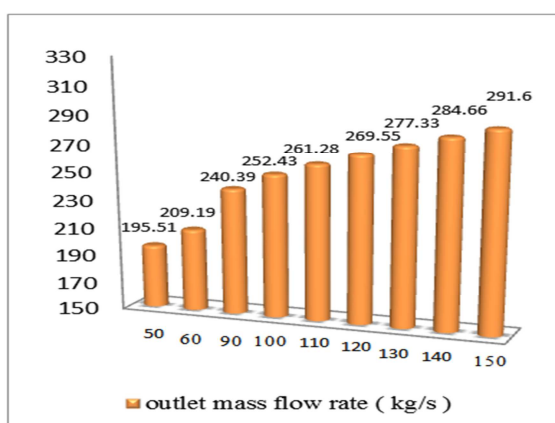
شکل ۲۰- تغییرات دمای استاتیکی هوا در ورودی توربین نسبت به شعاع دودکش به ازای ارتفاع دودکش متفاوت



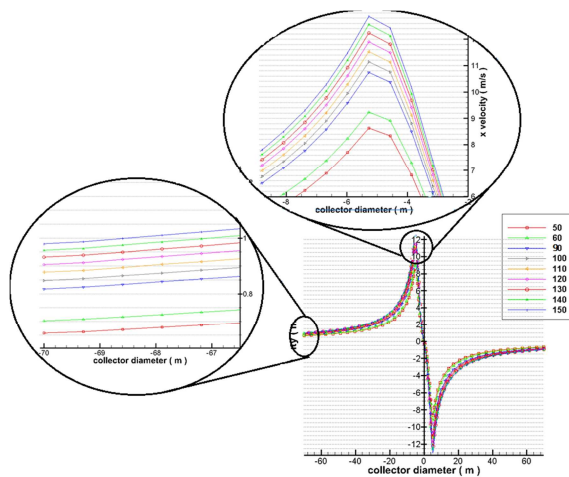
شکل ۲۱- تغییرات سرعت V_x جریان هوا در داخل کلکتور نسبت به شعاع کلکتور به ازای ارتفاع دودکش متفاوت



شکل ۲۲- تغییرات سرعت جریان بالا رونده در ورودی توربین نسبت به قطر دودکش به ازای ارتفاع دودکش متفاوت



شکل ۲۳- تغییرات دبی جرمی خروجی از سیستم به ازای تغییرات ارتفاع در دودکش



شکل ۲۴- تغییرات سرعت V_x جریان هوا در داخل کلکتور نسبت به شعاع کلکتور به ازای ارتفاع دودکش متفاوت

بنا بر نتایج به دست آمده، تغییر ارتفاع دودکش تأثیر مستقیم بر پارامترهای جریان گذاشته که طبیعتاً همه این عوامل تأثیر مستقیم بر میزان توان تولیدی توسط نیروگاه خواهد داشت. به طوری که می‌توان از پارامتر ارتفاع دودکش به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی سیستم نام برد. نتایج بررسی ها بیانگر تبعیت تولید توان نیروگاه از معادله ۹ باشد که R^2 رگرسیون معادله می باشد.

$$N_W = 112.09 H + 1662.8 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9983$$

در کل می توان به این موضوع اشاره کرد که افزایش ارتفاع دودکش از لحاظ افزایش توان محدودیتی در بر نخواهد داشت و لذا تنها محدودیت افزایش ارتفاع دودکش از لحاظ سازه‌ای خواهد بود. در جدول ذیل نشان داده شده است که تقریباً توان تولیدی در نیروگاهی با ارتفاع دودکش ۵۰ متر، برابر با ۷ کیلووات و توان نیروگاهی با ارتفاع دودکش ۱۵۰ متر، تقریباً برابر با ۱۸ کیلووات خواهد بود.

جدول ۳- تغییرات سرعت بالارونده و توان تولیدی سیستم با تغییر

ارتفاع در دودکش

ارتفاع دودکش [m]	سرعت بالارونده [m/s]	توان تولیدی [W]
۵۰	۶٫۶۵	۷۰۵۶٫۵۹
۶۰	۷٫۰۵	۸۳۱۱٫۷۸
۹۰	۸٫۰۷	۱۱۹۴۳٫۲
۱۰۰	۸٫۳۵	۱۳۰۴۹٫۳۸
۱۱۰	۸٫۶۲	۱۴۱۵۴٫۳۳
۱۲۰	۸٫۸۶	۱۵۱۷۵٫۶۶
۱۳۰	۹٫۱	۱۶۲۳۰٫۹۷
۱۴۰	۹٫۳۳	۱۷۲۷۲٫۵۶
۱۵۰	۹٫۵۴	۱۸۲۵۳٫۲۲

۹- نتیجه گیری کلی

نتایج به دست آمده نشان می دهند که تغییر ارتفاع دودکش تأثیر به سزایی بر پارامترهای دینامیکی و ترمودینامیکی جریان در قسمت‌های مختلف نیروگاه دودکش خورشیدی گذاشته و شدیداً میزان توان تولیدی وابسته به ارتفاع دودکش می باشد. آنچه که حایز اهمیت است، تأثیر مستقیم ارتفاع بر میزان توان تولیدی توسط نیروگاه می‌باشد. به عنوان مثال با افزایش ارتفاع دودکش به دو برابر، میزان توان تولیدی تقریباً به میزان ۸۰ درصد افزایش می یابد. تحلیل نتایج ترمودینامیکی و دینامیکی مساله نشان می‌دهد که اینرسی حرارتی خاک عامل بسیار مهمی در شکل گیری الگوی جریان و در نتیجه میزان گذر جرمی هوا از توربین می باشد که این نیز به نوبه خود میزان تولید توان را تحت تأثیر خود قرار خواهد داد.

۱۰- علائم و نمادها

T دما (°C) (°K)

Ra عدد رابلی

Gr عدد گراشف

Pr
G
N
C_p
K
h
U
F
H
R
R²
T
β
ΔT
Δp
ν
ρ
η

عدد پرانتل

شتاب گرانش زمین (m/s²)

توان خروجی (w)

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (j/kg. °K)

رسانایی گرمایی (w/m. °K)

ضریب انتقال گرمای همرفتی (w/m². °K)

سرعت جریان (m/s)

ضریب افت فشار بی بعد

ارتفاع (m)

شعاع (m)

کمیت رگرسیون

ضخامت (m)

ضریب انبساط گرمایی (1/°K)

اختلاف دما (°C) (°K)

اختلاف فشار (N/m²)

لزجت سینماتیکی (m²/s)

چگالی (kg/m³)

راندمان

۱۱- اندیس ها

a
Sky
Sta
Stagnation
B
T
W
C
S
g

اتمسفر

جریان آزاد هوا

استاتیکی

سکون

پای دودکش (ورودی توربین)

دودکش

توربین بادی

کلکتور

خاک

شیشه

۱۲- مراجع

[1] Cabanyes I., Proyecto de motor solar, Magazine La Energía Eléctrica (in Spanish) , 1903.

- [27] AbebayehuAssefa I., Daba R., Modeling and simulation of solar chimney power plant with and without the effect of thermal energy storage systems, M. Sc. Thesis , Addis Ababa institute of technology, 2011.
- [28] Adrian Bejag, Allan D. Kraus, "Heat Transfer Handbook", John Wiley, 2003
- [2] Günther H., In hundert Jahren - Die künftige Energieversorgung der Welt, Stuttgart Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde. M. Sc. Thesis , German ,1931.
- [3] Australia"Apparatus for "converting Solar to Electrical Energy, Canada"Utilization of Solar Energy", Israel"System and Apparatus for Converting Solar Heat to Electrical Energy", USA System for converting solar heat to electrical energy".
- [4]http://www.sbp.de/en/build/show/82-Solar_Chimney_Manzanares
- [5] Mills D., Advances in solar thermal electricity technology, Int. J. Solar Energy, Vol.76 , pp. 19–31, 2004.
- [6] Haaf W., Friedrich K., Mayr G., Schlaich J., Solar chimneys-part I: principle and construction of the pilot plant in Manzanares, Int. J. Sol Energy, Vol. 2, pp. 3-20 , 1983.
- [7] Haaf W., Solar chimneys-part II: preliminary test result from Manzanares pilot plant, Int. J. Sol Energy, Vol. 2, pp.141-61 ,1984.
- [8] Schlaich J. "The Solar Chimney , Electricity From The Sun" , Edition Axel Menges , Stuttgart , Germany 1995.
- [9] Schlaich J. , Schiel W. , "Solar Chimneys", in RA Meyers (ed), Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd Edition , Academic Press, London 2001.
- [10] Kreetz H., Theoretische Untersuchungen und Auslegung eins temporaren wasserspeichers fur das Aufwindkraftwerk, diploma thesis ,Technical University Berlin , Berlin, 1997.
- [11] Gannon A., Backstrom J., Solar Chimney Cycle Analysis with System Loss and Solar Collector Performance, Int. J. of Solar Energy engineering, Vol. 122, pp. 133-137, 2000.
- [12] Ruprecht A., Stromung Stechnische Gestaltung eines Aufwindkraftwerks (fluid dynamic design of a solar updraft power plant), Proceedings of the International Symposium uber Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, June 10-12 , Bauhaus - University Weimar, Germany, 2003.
- [13] Dos santos B. , Weinrebe G. , "Thermal and technical analysis of solar chimney" Int. J. of Solar Energy , vol.75 , pp. 511-524 , 2003.
- [14] Kasaeian A.B., Heidari E., NasiriVatan Sh. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant, Int. J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 5202– 5206 , 2011.
- [15]<http://www.enviromission.com.au/EVM/content/home.html>
- [16] Hurtado F.J., Kaiser A.S., Zamora B., Evaluation of the influence of soil thermal inertia on the performance of a solar chimney power plant, Int. J. Energy, Vol. 47, pp. 213-224 , 2012.
- [17] Zhou X., Yang J., Xiao B., Hou G., Xing F., Analysis of chimney height for solar chimney power plant, Int. J. Appl Thermal Eng., Vol. 29, pp. 178-185, 2009.
- [18] Gholamalizadeh E., Mansouri S. H., A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case – Kerman project, Int. J. Applied Energy, Vol.102 , pp. 975-982 , 2013.
- [19] Koonsrisuk A., Chitsomboon T., A single dimensionless variable for solar chimney power plant modeling, Int. J. Solar Energy, Vol. 83 , pp. 2136–2143 , 2009.
- [20] Sangi R., Amidpour M., Hosseinizadeh B., Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants, Int. J. Solar Energy, Vol. 85 , pp. 829–838 , 2011.
- [21] Guo P., Li J., Wang Y., Liu Y., Numerical analysis of the optimal turbine pressure drop ratio in a solar chimney power plant, Int. J. Solar Energy, Vol. 98 , pp. 42–48 ,2013.
- [22] Peng-hua G., Jing-yin L., Yuan W., Numerical simulations of solar chimney power plant with radiation model, Int. J. Renewable Energy ,Vol. 62 , pp. 24–30 , 2014.
- [23] Koonsrisuk A., Chitsomboon T., Partial geometric similarity for solar chimney power plant modeling, Int. J. Solar Energy, Vol.83 , pp. 1611–1618 , 2009.
- [24] Sangi R. Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran, Int. J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16 , pp. 704 – 710 , 2012.
- [25] Asnaghi A., Ladjevardi S.M., Solar chimney power plant performance in Iran, Int. J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16 , pp. 3383–3390 , 2012.
- [26] 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, Int. J. Renewable Energy, Vol. 63 ,pp. 498 - 506 ,2014.