



Investigation of Geometrical Parameters and Hydrophobic Surfaces on the Performance of Solar Chimney Power Plant

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Aligholami M.¹ MSc,
Rostamzadeh Khosroshahi A.*¹
PhD

How to cite this article

Aligholami M, Rostamzadeh Khosroshahi A. A Investigation of Geometrical Parameters and Hydrophobic Surfaces on the Performance of Solar Chimney Power Plant. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(10): 2397-2407.

ABSTRACT

The aim of this study is the modeling of the solar chimney for achieving the relation between turbine output power and geometrical parameters. In this regards, 9 different models are determined based on the variety of chimney height and diameter for investigating the effects of geometrical parameters on the turbine performance. As well as, in order to improvement of system performance, the hydrophobic surfaces were evaluated with consideration of friction reduction by verification of slip condition on walls. The k- ϵ turbulent model was used to modeling turbulence flow and reverse-fan model was employed for simulating the turbine. For this purpose, the extracted data from the mass flow rate and velocity changes were validated with prior studies and then were compared in different pressure jumps in order to better comprehension of the performance of the turbine. The optimization was done through the defined models and it was observed that to have a better and optimized design, the geometrical parameters should have been considered in the system design simultaneously. Meanwhile, the chimney diameter should have been paid more attention as one of the most important design parameters. Also, the precise correlation was represented to estimate the turbine output power with respect to the height and diameter of the chimney. Furthermore, based on the applying of slip condition on walls for simulating hydrophobic surfaces, shear stresses reduction was done and it was revealed that the hydrophobic surfaces could have a positive effect on the performance of SCPP up to 5 percent.

Keywords Solar Chimney Power Plant, Numerical Simulation, Geometrical Parameters, Slip Condition, Drag Reduction, Hydrophobic Surfaces

¹Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. Postal Code: 5157944533
Phone: -
Fax: +98 (41) 33317146
arostamzadeh@iaut.ac.ir

Article History

Received: December 17, 2018
Accepted: February 22, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

[1] An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters [2] Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney [3] Solar chimneys part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares [4] Solar chimneys part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant [5] Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants [6] Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants - a multi-objective optimization approach [7] Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant [8] Numerical evaluation of a solar chimney geometry for different ground temperatures by means of constructal design [9] Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney [10] Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines [11] Large-scale motions in a turbulent channel flow with the slip boundary condition [12] Flow condensation heat transfer enhancement in a mini-channel with hydrophobic and hydrophilic patterns [13] Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in a rotating U-shaped hydrophobic microchannel with slip flow and temperature jump boundary conditions [14] Effect of the turbulence model on the simulation of the air flow in a solar chimney [15] Documentation Manual - FLUENT 17.0. [Internet] [16] Mathematical modeling of solar chimney power plants. Energy [17] NASA-TM-110446: Turbulence modeling validation, testing, and development [Internet]

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و سطوح آب‌گریز بر عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی

میثم علی غلامی MSc

گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

علیرضا رستمزاده خسروشاهی PhD*

گروه مهندسی مکانیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

چکیده

هدف اصلی این مطالعه، مدل‌سازی دودکش خورشیدی برای به‌دست‌آوردن رابطه بین توان تولیدی توربین و پارامترهای هندسی است که در این راستا ۹ مدل مختلف براساس ارتفاع و قطر دودکش برای بررسی میزان تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد توربین تعریف شده است. همچنین به‌منظور ارتقای عملکرد سیستم، سطوح آب‌گریز با اعمال شرط لغزش در دیواره‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل $k-\epsilon$ برای مدل‌سازی جریان آشسته مورد استفاده قرار گرفته و روش فن معکوس به‌منظور شبیه‌سازی توربین استفاده شده است. برای این منظور ابتدا نتایج به‌دست‌آمده از تغییرات سرعت و دبی جرمی طبق مطالعات پیشین اعتبارسنجی شده و سپس با اعمال جهش‌های فشاری مختلف بر توربین میزان اثرپذیری پارامترهای هندسی مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. با مقایسه اجمالی نمودارهای دبی جرمی و توان خروجی توربین مدل‌ها مشاهده شد که حالت بهینه دودکش نسبت به یک شرایط خاص قابل تعریف بوده و امکان تعریف یک حالت کلی بهینه برای دودکش خورشیدی وجود ندارد. به عبارتی پارامترهای هندسی مورد مطالعه بایستی به‌طور همزمان در طراحی سیستم مورد ارزیابی قرار گیرند. همچنین در این مطالعه رابطه‌ای بین توان تولیدی توربین و ارتفاع و قطر دودکش برای یک حالت خاص به عنوان نمونه ارائه شده است. در نهایت، با اعمال شرط لغزش در دیواره‌ها برای شبیه‌سازی سطوح آب‌گریز، سعی بر کاهش میزان تنش برشی در دیواره شده که به ارتقای ۵ درصدی عملکرد سیستم منجر شده است.

کلیدواژه‌ها: دودکش خورشیدی، شبیه‌سازی عددی، پارامترهای هندسی، شرط لغزش، پسای توربولانسی، سطوح آب‌گریز (هیدروفوبیک)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۳

*نویسنده مسئول: arostamzadeh@iaut.ac.ir

مقدمه

با شناخت انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبعی پاک و جایگزینی مناسب برای ارضاء تقاضای انرژی و ضرورتی اساسی در توسعه اقتصادی و البته در راستای اهداف بین‌المللی جهت جلوگیری از اثرات تخریب‌پذیر انرژی‌های فسیلی و ایجاد فضایی سالم و پایدار، سیستم‌های متفاوتی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی معرفی شده‌اند. در بین سیستم‌های موجود، نیروگاه دودکش خورشیدی دارای مزیت‌هایی بوده که از این حیث می‌توان به لحاظ فنی، به هزینه نگهداری و صدای بسیار کم آن اشاره داشت. همچنین در این سیستم، هیچ گونه نیازی به انرژی الکتریکی به عنوان محرک وجود ندارد، بنابراین دودکش خورشیدی به عنوان یکی از راهکارهای مناسب همواره قابل توجه مهندسين انرژی می‌باشد. در این راستا، قلمچی و همکاران مطالعاتی جامع در ارزیابی، تعیین توزیع دما و سرعت هوا در شرایط متفاوت بر اساس دودکش خورشیدی آزمایشی ساخته‌شده به قطر کلکتور ۳ متر و ارتفاع دودکش ۳ متر پرداختند که بر این اساس، ابعاد بهینه‌ای برای ارتفاع دودکش و سایز ورودی جریان هوا قابل تعریف بوده و قطر دودکش و ارتفاع ورودی کلکتور به عنوان مهم‌ترین شاخص هندسی در عملکرد دودکش خورشیدی بیان گردیده است^[1, 2]. همچنین در ادامه اولین ایده نیروگاه دودکش خورشیدی که در سال ۱۹۳۱ توسط هانس گوتتر ارائه و مدل اولیه آن با ارتفاع ۱۹۵ متر در سال ۱۹۸۳

توسط حاف و همکاران در اسپانیا ارائه و ساخته شد^[3, 4]، سنگی و همکاران^[5] با بررسی و مقایسه دو مدل ریاضی بر اساس نتایج به‌دست آمده در نیروگاه مانزانارس اسپانیا (Manzanares-Spain) بر درستی و دقت عمل شبیه‌سازی دودکش توسط نرم‌افزار تأکید کردند. دهقانی و همکاران^[6] نیز با تعریف یک مدل ریاضی و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک، به شبیه‌سازی دودکش خورشیدی پرداختند. در این مطالعه با تعریف دو تابع هدف توان تولیدی توربین و میزان سرمایه، نتایج در ابعاد هندسی متفاوت به‌دست آمده و به عنوان نمونه، ارتفاع و قطر بهینه دودکش به همراه قطر بهینه کلکتور معرفی شده است. همچنین مطالعات انجام‌شده در این مقاله بیانگر افزایش توان تولیدی توسط توربین با افزایش میزان تشعشع خورشیدی است. این در حالی است که بررسی‌ها در این تحقیق حاکی از کاهش میزان توان تولیدی در درجه حرارت‌های بالاست. پاتل و همکاران^[7] نیز با بررسی پارامترهای هندسی مؤثر توسط نرم‌افزار محاسباتی فلوئنت، به بهینه‌سازی دودکش خورشیدی مورد نظر پرداختند. بر این اساس، آنها با تعریف ۱۲ مدل مختلف و با ثابت فرض نمودن ارتفاع دودکش و قطر کلکتور، به مطالعه نحوه تغییرات سرعت و دمای جریان ورودی در محدوده ورودی کلکتور از ۰/۵ تا ۰/۲ متر پرداختند. همچنین میزان توان تولیدی توربین در زوایای مختلف و اگرایی دودکش (صفر تا ۳ درجه) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر این اساس با بیان ارتفاع ورودی کلکتور به عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد سیستم، ارتفاع ۰/۵ متر به عنوان بهترین ارتفاع ورودی در بین مدل‌های مورد ارزیابی، معرفی گردیده است. همچنین با مقایسه توان تولیدی و میزان انرژی جنبشی توربولانسی بر عملکرد بهتر سیستم توسط دودکش واگرا با ۲ درجه واگرایی نسبت به دودکش‌های همگرا و صاف تأکید شده است. ویبر و همکاران^[8]، با بیان اهمیت ابعاد دودکش و کلکتور در طراحی دودکش خورشیدی، سعی بر مدل‌سازی سیستم به روش حجم محدود داشته‌اند که در این مطالعه با اعمال درجه حرارت‌های مختلف به سطح زمین به عنوان روشی جایگزین بر میزان تشعشع خورشیدی به ارزیابی توان تولیدی پرداختند. بر این اساس با تعریف و تغییر مقدار نسبت شعاع به طول و با مقایسه تغییرات ایجادشده در عدد گراش، میزان تأثیر ابعاد هندسی بر توان تولیدی سیستم بیان شده است. به عبارتی می‌توان اشاره داشت که با تعریف نسبت فوق، میزان واگرایی و یا همگرایی دودکش مورد ارزیابی قرار گرفته و ناکارآمد بودن تغییرات زیاد در واگرایی یا همگرایی در بهبود عملکرد سیستم بیان شده است. در مطالعه مایا و همکاران^[9] نیز با تأکید بر اهمیت بالای پارامترهای هندسی بر عملکرد دودکش خورشیدی، ابعاد دودکش به عنوان مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر ایجاد جریان هوای آشسته داخل دودکش، بیان شده است. به‌طوری‌که طبق این مطالعه، افزایش ارتفاع و قطر دودکش منجر به افزایش دبی جرمی شده و همچنین کاهش دمای جریان را نیز به دنبال دارد. لی^[10] نیز در راستای بهبود عملکرد دودکش خورشیدی کوپل‌شده با توربین، به مطالعه متغیرهای هندسی مؤثر بر عملکرد سیستم مانند ارتفاع دودکش و شعاع کلکتور پرداخت. وی علاوه بر تأکید بر ارتفاع دودکش و قطر کلکتور به عنوان تأثیرگذارترین متغیرهای هندسی بر عملکرد سیستم، با تعیین نمودار دبی جرمی جریان با توان خروجی توربین، محدوده نقاط طراحی توربین را نیز مشخص نمود. بر این اساس، ماکزیمم توان خروجی شامل دبی جریان کمتری بوده و موجب افزایش دمای بیشتری شده که در نتیجه این افزایش دما، انرژی بیشتری توسط خاک جذب می‌شود و به عنوان

معادلات حاکم

دودکش خورشیدی بر اساس نیروی شناوری (Buoyancy Force) عمل می کند. بر اثر این پدیده، هوای ورودی به سیستم توسط تشعشع تابشی عبوری از سقف کلکتور گرم شده و بر اثر کاهش چگالی، جریان بالا رونده ایجاد می گردد. لذا وجود یک مکانیزم جهت تبدیل انرژی مکانیکی ایجاد شده در دودکش به انرژی الکتریکی بسیار حائز اهمیت می باشد. از مزایای این مکانیزم می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قابلیت بهره گیری بالای کلکتور از تشعشع خورشیدی،
 - عملکرد ۲۴ ساعته سیستم با توجه به وجود لایه زیرین در نقش لایه ذخیره انرژی،
 - عملکرد مطمئن و قابل اعتماد سیستم با توجه به نوع ساختار آن و پایین بودن هزینه های نگهداری،
 - عدم نیاز به سوخت، محرک و آب خنک کننده در عملکرد سیستم.
- معادلات اساسی حاکم بر جریان شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی در سیستم مختصات استوانه ای به شکل زیر می باشند [14, 15].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - 2\mu \frac{u}{r^2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u w) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - (\rho_0 - \rho) g \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho V T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

همچنین محاسبات انرژی جنبشی و میزان اتلاف بر اساس مدل توربولانسی k-ε به صورت زیر می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

ویسکوزیته توربولانسی نیز به صورت رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_k = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

مقادیر استفاده شده $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k و σ_ε به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۰/۰۹ و ۱/۳ می باشند. با توجه به جریان جابجایی طبیعی در سیستم، از عدد گراشهف به شکل زیر استفاده شده است.

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \Delta T \cdot L^3}{\mu^2} \quad (8)$$

همچنین جهت تعیین طبیعی یا اجباری بودن جریان از تعریف عدد ریچاردسون به صورت زیر استفاده شده است.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{\beta \cdot g \cdot \rho^2 \Delta T \cdot L}{\mu^2} \quad (9)$$

مناسب ترین محدوده طراحی معرفی گردیده است. لذا می توان اشاره داشت که به طور کلی بهبود عملکرد سیستم دودکش خورشیدی به عنوان یکی از نیروگاه های مؤثر در بهره گیری از انرژی پاک خورشید دارای اهمیت بسیار بالایی است. علاوه بر تأثیرگذاری پارامترهای هندسی در بهبود عملکرد این سیستم، می توان به مکانیزم های کاهش نیروی پسای توربولانسی (Turbulent Drag Reduction) در سطوح داخلی کلکتور نیز به عنوان یکی دیگر از روش های مؤثر در این امر اشاره داشت. به طور کلی، پسای توربولانسی به عنوان نیروی مخالف با جریان، باعث کاهش میزان دبی جرمی ورودی شده که در نتیجه آن افت راندمان سیستم را در بردارد. در راستای راهکارهای مختلف کنترل و کاهش پسای توربولانسی، صفحات آبگریز (Hydrophobic Surfaces) قابل توجه محققین بوده است. با تعریف شرط لغزش در سطوح آبگریز برخلاف شرط عدم لغزش در دیواره که همواره در محاسبات مسائل مختلف سیالاتی مورد استفاده قرار گرفته است، اجازه ورود بیشتر جریان به سیستم به دلیل کاهش میزان تنش برشی در سطح داده می شود. بر این اساس، یون و همکاران [11] به بررسی شرط لغزش در کانال با جریان توربولانسی در ابعاد وسیع به وسیله شبیه سازی عددی مستقیم پرداختند. کاهش ۳۵ درصدی ضریب اصطکاک در دیواره در حالت آبگریز نسبت به حالت عادی در عدد رینولدز یکسان، از مهم ترین نتایج این بررسی می باشد. همچنین دربی و همکاران [12] با تعریف الگو و طرح های مختلف از سطوح آبگریز و آب دوست در کانال های کوچک به بررسی میزان افزایش انتقال حرارت در فرآیند میعان سیال پرداختند. مطالعه آنها ضمن تأکید بر کاهش میزان نیروهای هیدروپنماتیکی مخالف با جریان در حالت آبگریز، بر افزایش میزان انتقال حرارت جهت میعان سیال عامل در هر دو حالت آبگریز و آب دوست تا ۴۲۵۰۰۰ وات بر متر مربع کلوین اشاره داشته است. سوهان کار و همکاران [13] نیز به مطالعه عددی میزان انتقال حرارت و افت فشار با شرط لغزش در میکروکانال های دوار با صفحات آبگریز u شکل پرداختند. بر این اساس، سه مدل تعریف شده در مطالعه آنها بر اساس میزان جهش دمایی، شرط لغزش و سرعت دورانی در محدوده صفر تا ۳۰۰ رادیان بر ثانیه مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین طول های متفاوت لغزش (Slip Length) از صفر (آبگریز) تا ۱۰ میکرومتر مورد مطالعه قرار گرفته است. طبق این تحقیق، میزان انتقال حرارت در حالت آبگریز نسبت به حالت آب دوست افزایش یافته است. همچنین محاسبات حاکی از کاهش قابل ملاحظه میزان افت فشار و افزایش عدد ناسلت با افزایش طول لغزشی است. ضریب عملکرد حرارتی نیز تا ۹۰ درصد در طول لغزشی ۱۰ میکرومتر افزایش یافته است.

در مطالعه حاضر، برای اولین بار بررسی تأثیر همزمان تغییر ابعاد هندسی دودکش و نیز تغییر نوع سطح بر توان تولیدی توربین انجام شده است. برای این منظور به دلیل اهمیت ابعاد هندسی و تأثیر آن بر عملکرد سیستم دودکش خورشیدی، یک مطالعه گسترده در خصوص تغییرات قطر و ارتفاع دودکش انجام شده است. از این رو با شبیه سازی ۹ مدل متفاوت بر مبنای ارتفاع و قطر دودکش، تغییرات دبی جرمی و سرعت در ورودی کلکتور مورد ارزیابی قرار گرفته و توان تولیدی توربین که به حالت فن معکوس (Reverse Fan) مدل شده است مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین در مطالعات قبلی انجام شده از سطوح آب دوست استفاده شده است که در این مطالعه تأثیر نوع سطح نیز به عنوان یک پارامتر اساسی بررسی شده است. مدل سازی دودکش با دو نوع

اثر دودکش (Chimney Effect) نیز توسط رابطه زیر بیان شده است.

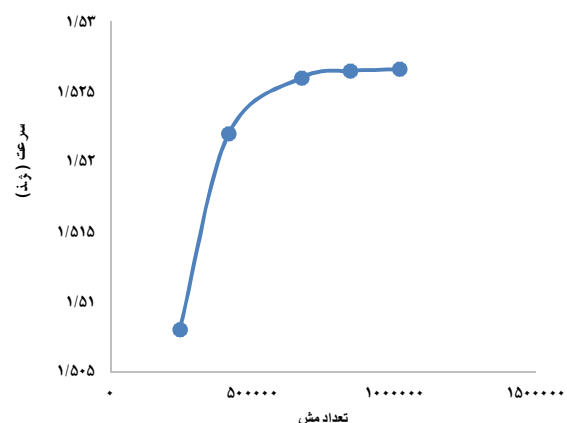
$$\Delta P_{Stack} = gH\Delta\rho = \rho gH \frac{\Delta T}{T_i} \quad (10)$$

مدل فیزیکی و شرایط مرزی

هدف اصلی این مطالعه، مدل‌سازی دودکش خورشیدی جهت به‌دست آوردن رابطه بین توان تولیدی توربین و پارامترهای هندسی می‌باشد. مطالعات انجام‌گرفته قبلی تأکید بر اهمیت بالای پارامترهای هندسی بر رفتار جریان هوا داشته‌اند که این رفتار بر توان تولیدی توربین تأثیرگذار است. لذا جهت بررسی این موضوع، ۹ مدل متفاوت بر اساس ارتفاع و قطر دودکش تعریف شده است که مشخصات هندسی آن‌ها طبق جدول ۱ می‌باشد. در این مطالعه از نرم‌افزار انسیس فلوئنت (Ansys- Fluent) استفاده شده است. تعداد مش مورد استفاده در مدل‌ها نیز طبق همین جدول ارائه شده است. شایان ذکر است استقلال از مش برای تمامی مدل‌ها بر مبنای دبی جرمی در ورودی و سرعت جریان در خروجی انجام گرفته است که به عنوان مثال در مدل شماره ۲، مقادیر برای تعداد مش ۲۴۳۸۴۰، ۴۱۶۰۰۰ و ۶۷۲۱۶۰ به ترتیب نمودار ۱ بوده و مشاهده می‌گردد که از تعداد مش ۴۱۶۰۰۰ به بالا می‌توان از تغییرات مقادیر با دقت قابل قبولی چشم‌پوشی کرده و لذا سایر مراحل مدل‌سازی بر مبنای تعداد مش ۴۱۶۰۰۰ انجام می‌گردد.

جدول (۱) مشخصات هندسی مدل‌های بررسی‌شده

مدل	ارتفاع دودکش (m)	قطر دودکش (cm)	تعداد مش
۱	۲	۱۰	۱۷۱۱۲۰
۲	۲	۲۰	۴۱۶۰۰۰
۳	۲	۳۰	۸۶۶۱۱۲
۴	۳	۱۰	۳۸۹۰۸۸
۵	۳	۲۰	۷۰۲۰۰۰
۶	۳	۳۰	۱۱۹۳۷۱۲
۷	۴	۱۰	۹۸۸۰۰۰
۸	۴	۲۰	۱۱۲۰۱۶۰
۹	۴	۳۰	۱۵۲۱۳۱۲



نمودار (۱) روند استقلال از مش بر مبنای سرعت در خروجی برای مدل ۲

همچنین، مدل توربولانسی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ در جریان‌های داخلی که دارای گرادیان فشار پایینی باشند، دارای دقت مناسبی می‌باشد. بعلاوه با توجه به اینکه جریان هوا در داخل دودکش خورشیدی به دلیل گرادیان دانسیته هوا اتفاق می‌افتد و دارای گرادیان فشار

پایینی است، مدل مذکور در حالت استاندارد مورد استفاده قرار گرفته است^[17]. همچنین طبق بررسی‌های انجام‌شده در مرجع^[14] که به مقایسه جامع مدل‌های توربولانسی با نتایج واقعی به‌دست آمده در مطالعات پیشین پرداخته است در این مطالعه با بررسی تغییرات سرعت در طول کلکتور و دودکش و البته با ارائه نمودارهای مربوط به تغییرات دما مشاهده گردیده است که مدل توربولانسی $k-\epsilon$ تطابق بیشتری با نتایج تجربی داشته و بنابراین با علم به نتایج مقاله مربوط و مراجع مذکور از مدل توربولانسی $k-\epsilon$ با دقت قابل قبولی در این مطالعه بهره گرفته شده است. شرایط مرزی حاکم بر مسئله مطابق جدول ۲ می‌باشند. با انتخاب این شرایط مرزی، بدون اعمال جریان اجباری، یک جریان جابجایی طبیعی به دلیل ایجاد اختلاف دما و پیرو آن اختلاف چگالی ناشی از انتقال حرارت بین کلکتور و سیال ایجاد می‌شود.

جدول (۲) شرایط مرزی دودکش خورشیدی

مکان	نوع شرط مرزی	مقادیر
سطح دودکش	دیواره	شرایط حرارتی: شار حرارتی $0 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ضخامت دیواره: 0.004 متر
سطح کلکتور	دیواره	شرایط حرارتی: همرفت ضریب انتقال حرارت جابجایی $5 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$ نرخ تولید حرارت $42 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ضخامت دیواره: 0.003 متر
زمین	دیواره	شرایط حرارتی: شار حرارتی $314 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ضخامت دیواره: 0.01 متر
توربین	فن معکوس	اختلاف فشار: براساس حالت‌های مختلف مورد مطالعه
ورودی کلکتور	فشار ورودی	$P_0 = 0 \text{ Pa, } T_0 = 302 \text{ K}$
خروجی دودکش	فشار خروجی	$P_0 = 0 \text{ Pa, } T_0 = 302 \text{ K}$

همچنین خواص و جزئیات متریال استفاده شده نیز بر اساس جدول ۳ است و از پلی‌کربنات به عنوان دودکش و از آلومینیوم به دلیل بالابودن ضریب هدایت گرمایی آن، به عنوان کلکتور استفاده شده است. شیشه نیز به عنوان متریال مناسب جهت عبور تشعشع خورشید در سقف کلکتور مورد استفاده قرار گرفته است. بالابودن ضریب عبور تشعشعی شیشه و مهیامنودن اثر گلخانه‌ای مناسب از دلایل این انتخاب بوده است. درجه حرارت هوای محیط 30.2°C کلوین بوده و میزان تشعشع خورشیدی $850 \text{ وات بر متر مربع}$ فرض شده است.

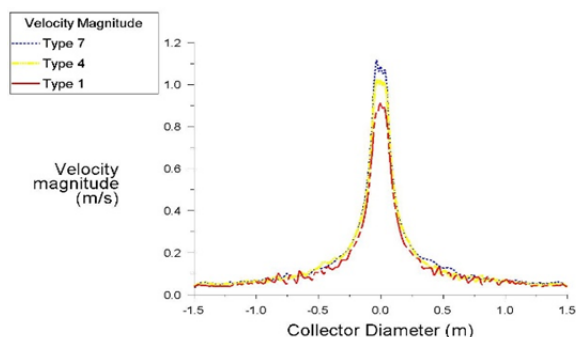
جدول (۳) خواص متریال استفاده‌شده

نوع ماده	چگالی (Kg/m^3)	گرمای ویژه (J/Kg.K)	رسانایی حرارتی (W/m.K)
پلی‌کربنات	۱۲۰۰	۱۱۷۰	0.205
آلومینیوم	۲۷۱۹	۸۷۱	$20.2/4$
شیشه	۲۵۳۰	۷۶۰	۱
هوا	۱/۲۲۵	۱۰۰۶/۴۳	0.0242

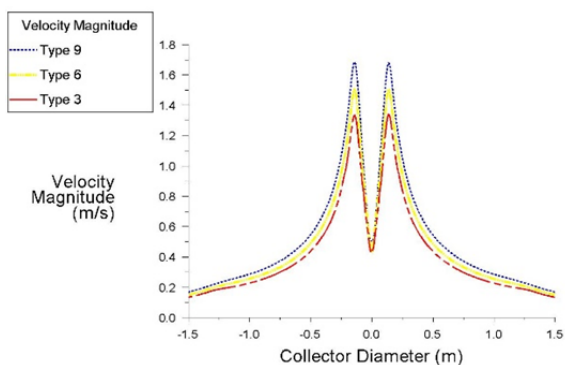
اعداد بی‌بعد رینولدز و ریچاردسون نیز برای مدل‌های مختلف بر اساس جدول ۴ می‌باشند. بر این اساس عدد رینولدز جریان از 16974 تا 34206 متغیر بوده که نشانگر آشفته‌بودن جریان در داخل دودکش خورشیدی است. همچنین اعداد محاسبه‌شده برای عدد ریچاردسون نیز بیانگر حائز اهمیت بودن جریان طبیعی در سیستم می‌باشد.

مرکز دودکش شاهد هستیم. علت این امر تبادل حرارت بین کلکتور و جریان هوای عبوری از بالای کلکتور می‌باشد، به‌طوری‌که این جریان هوا رفته رفته با افزایش هرچه بیشتر دمای خود، انرژی جنبشی بیشتری نیز به‌دست می‌آورد. همچنین، طبق رابطه ۱۰ با افزایش ارتفاع دودکش میزان اثر دودکش نیز بیشتر شده که به طبع آن شاهد بهبود بازده سیستم می‌باشیم. این در حالی است که با توجه به نمودار ۶ با افزایش ارتفاع دودکش در قطر ثابت ۲۰ سانتی‌متری شاهد یک نقطه ماکزیمم هستیم، که این بدان معناست که امکان تعریف یک ارتفاع بهینه در محدوده ۲، ۳ و ۴ متری برای دودکش وجود دارد و سرعت جریان در مرکز دودکش در حالت ۳ متری ماکزیمم مقدار است. شایان ذکر است که علت وجود یک نقطه ماکزیمم و یا به عبارتی وجود یک حالت بهینه نیز با توجه به رابطه ۱۰ قابل توجیه می‌باشد. به نحوی که اثر دودکش علاوه بر رابطه خطی با ارتفاع دودکش با تغییرات دما نیز رابطه خطی دارد که افزایش هرچه بیشتر ارتفاع، موجب افت نسبی در جریان بالارونده شده که این امر باعث کاهش میزان اختلاف دما نیز می‌شود. بنابراین با افزایش بیش از حد ارتفاع دودکش احتمال ایجاد جریان معکوس داخل دودکش نیز وجود دارد که بایستی به عنوان یک عامل منفی در عملکرد سیستم از آن پیشگیری شود. بدیهی است وجود یک ارتفاع بهینه در قطرهای ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متری نیز در ارتفاع‌هایی خارج از محدوده ابعادی این مطالعه محتمل بوده و قابل بررسی است.

نمودار ۷، روند تغییرات سرعت بین نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی [۱] را نشان می‌دهد که تطابق مناسب بین نتایج به‌دست آمده، صحت مدل‌سازی انجام‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.



نمودار ۴) تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



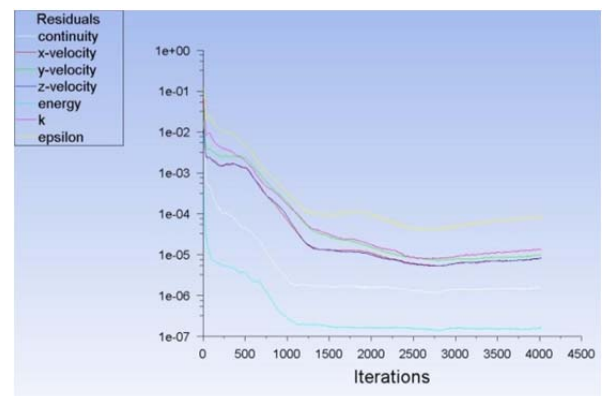
نمودار ۵) تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر (حالت بدون توربین)

جدول ۴) مقادیر اعداد رینولدز و ریچاردسون برای مدل‌های تعریف‌شده

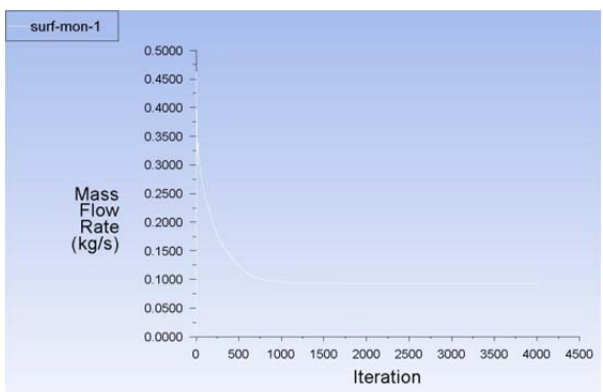
شماره مدل	عدد رینولدز	عدد ریچاردسون
۱	۱۶۹۷۴	۷
۲	۲۴۲۰۳	۱۵
۳	۲۷۳۶۰	۲۶
۴	۱۹۰۷۵	۵
۵	۳۰۴۳۲	۷/۸
۶	۳۰۵۶۸	۲۱
۷	۲۰۲۵۲	۴/۱
۸	۲۹۷۸۸	۸
۹	۳۴۲۰۶	۱۶

ارزیابی عملکرد سیستم بدون توربین

در این مطالعه، ابتدا مدل‌ها به لحاظ تغییرات سرعت در ارتفاع‌های مختلف دودکش با یک قطر دودکش ثابت و در حالت بدون توربین مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. تمامی مدل‌ها تا بیش از ۴ رقم اعشار در تمامی پارامترهای مؤثر همگرا شده که به عنوان نمونه روند همگرایی سیستم در نمودار ۲ برای مدل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین جهت اطمینان از صحت حصول نتایج و اتکای هر چه بهتر بر نتایج، در تمامی مدل‌ها دبی جرمی در ورودی و عدد رینولدز توربولانسی حین همگرایی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است که نمونه آن برای دبی جرمی طبق نمودار ۳ بوده و مشاهده می‌گردد که مقادیر مربوطه تثبیت و قابل اطمینان می‌باشد.



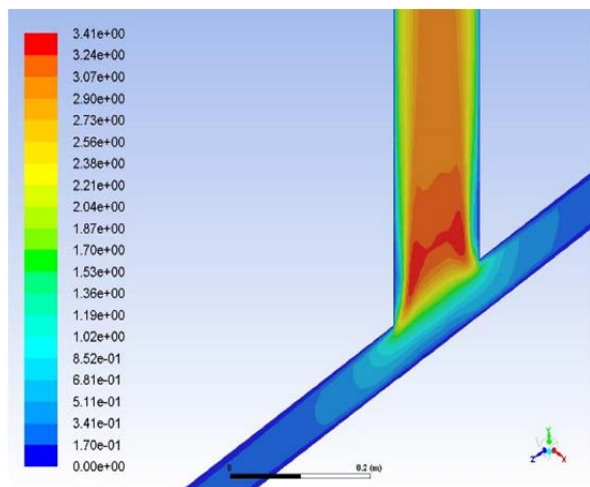
نمودار ۲) همگرایی پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی مدل شماره ۳



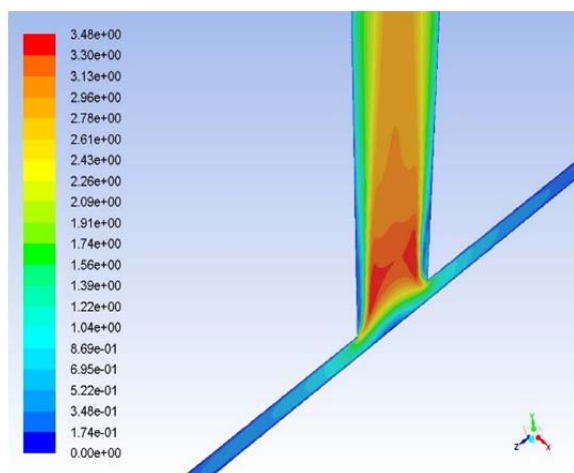
نمودار ۳) تغییرات دبی جرمی در ورودی حین همگرایی سیستم در مدل شماره ۳

با توجه به نمودارهای ۴ و ۵ که تغییرات سرعت را در فاصله ۳ سانتی‌متری از سطح زمین و در قطر ثابت ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری نشان می‌دهند، یک روند کاملاً صعودی را با افزایش ارتفاع دودکش، از حدود ۰/۲ متر بر ثانیه در ورودی تا ۱/۶ متر بر ثانیه در

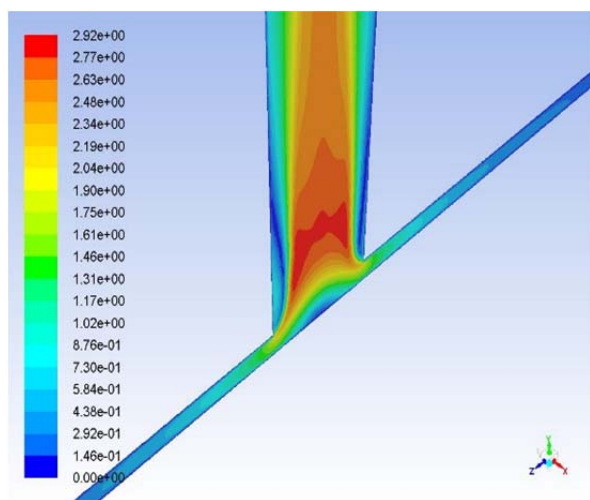
میزان تشعشع جذب‌شده توسط صفحه جاذب افزایش یافته و در نتیجه، میزان تبادل حرارت با جریان هوای عبوری از بالای سطح جاذب نیز افزایش می‌یابد. لذا در اثر بالا رفتن نیروی شناوری و اثر دودکش، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد.



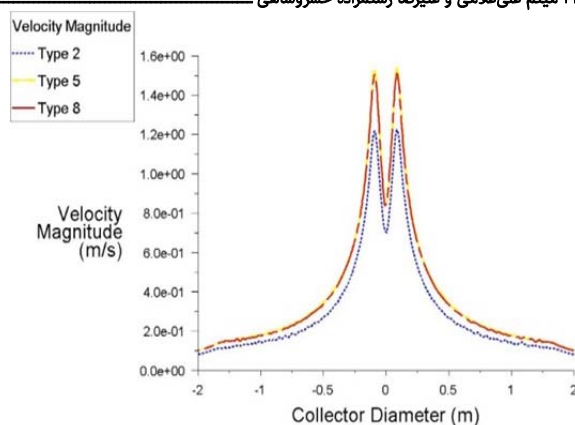
شکل (۱) کانتور سرعت در مقطع مرکزی مدل شماره ۱



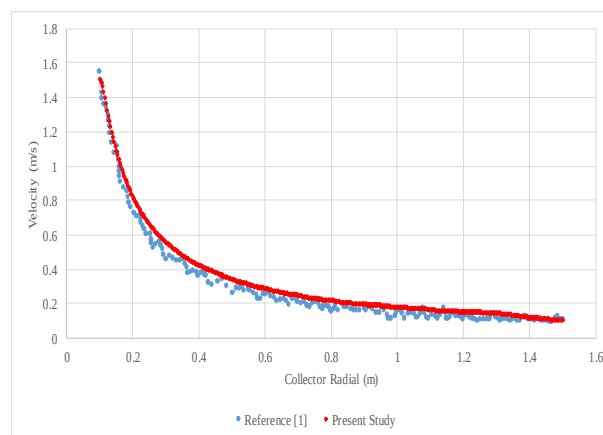
شکل (۲) کانتور سرعت در مقطع مرکزی مدل شماره ۵



شکل (۳) کانتور سرعت در مقطع مرکزی مدل شماره ۹



نمودار (۴) تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



نمودار (۵) مقایسه تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با ارتفاع دودکش ۳ متر، قطر دودکش ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر (مدل شماره ۵) با مرجع [۱]

شایان ذکر است علت پدید آمدن دو نقطه ماکزیمم در قطر ثابت ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متری، رودرویی جریان در مرکز کلکتور تا ارتفاع ۳ سانتی‌متری از سطح زمین، که تمامی این نمودارها نیز در این ارتفاع ترسیم شده‌اند، می‌باشد. به‌طوری که با افزایش میزان دبی جرمی در قطرهای بالاتر از ۱۰ سانتی‌متری، اندرکنش جریان افزایش یافته و لذا سرعت در این ناحیه کاهش می‌یابد که این مورد با مقایسه شکل‌های ۱، ۲ و ۳ قابل رویت است. به عبارتی می‌توان گفت، با افزایش قطر و ارتفاع دودکش یک ناحیه به مرکزیت محور دودکش در نزدیکی سطح زمین ایجاد می‌شود که رفته رفته این ناحیه شکل گرفته و شعاع آن افزایش یافته و سرعت جریان نیز در این ناحیه به شدت کاهش می‌یابد. لذا بر این اساس می‌توان بر مفید بودن یک دیواره راهنما به مرکزیت دودکش در دودکش‌هایی با مقیاس بالاتر تأکید داشت.

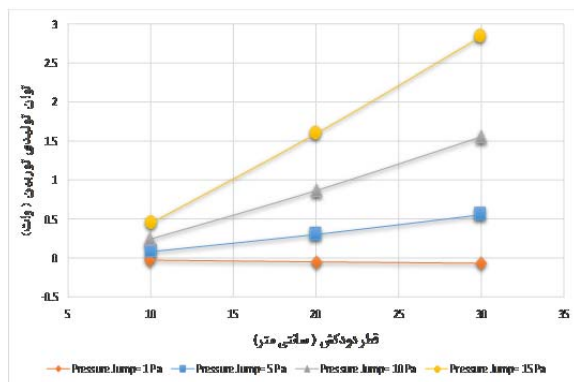
همچنین در نمودارهای ۸، ۹ و ۱۰ نیز همانند سایر نمودارها، نحوه تغییرات سرعت در ارتفاع ۳ سانتی‌متری از سطح زمین ارائه شده است که البته این نمودارها با ثابت در نظر گرفته شدن ارتفاع و افزایش قطر دودکش می‌باشند. لذا با توجه به روند تغییرات سرعت در ارتفاع ثابت، می‌توان گفت که با افزایش قطر کلکتور، همواره یک روند صعودی وجود دارد. با توجه به نحوه عملکرد سیستم دودکش خورشیدی، علت این امر در افزایش سطح مقطع صفحه جاذب ناشی از افزایش قطر کلکتور می‌باشد، چرا که با افزایش این سطح،

۱۲ و ۱۳ که بیانگر تغییرات توان خروجی توربین بر اساس افزایش قطر دودکش و در ارتفاع‌های دودکش ثابت و با افزایش میزان جهش فشاری توربین است، مشاهده می‌شود که با افزایش جهش فشاری در یک ارتفاع و قطر ثابت، توان خروجی توربین افزایش می‌یابد. همچنین طبق این نمودارها، عموماً با افزایش قطر در یک فشار ثابت، یک روند رو به رشد قابل مشاهده است. علی‌رغم مشاهدات فوق، شیب نمودار تغییرات خروجی توربین با افزایش میزان جهش فشار، افزایش یافته است که دلیل این امر با توجه به رابطه (۱۱) قابل توجیه می‌باشد. بر اساس رابطه (۱۱)، توان تولیدی توربین نه فقط با میزان دبی جرمی عبوری از آن بلکه با اختلاف فشار اعمال‌شده توسط توربین نیز رابطه مستقیم دارد [16]، لذا شیب نمودار به‌دست آمده، قابل توجیه می‌باشد.

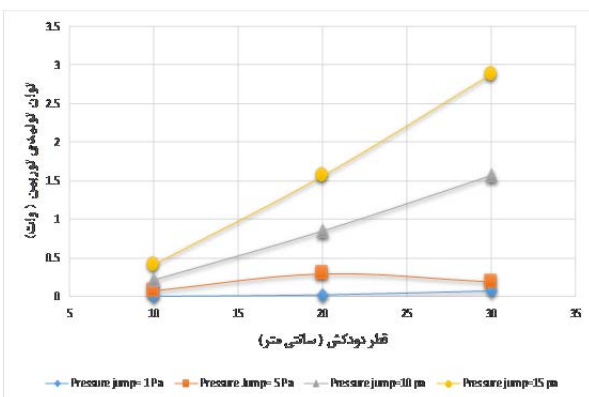
$$\dot{W}_{ext} = \frac{\dot{m}}{(\rho_1 + \rho_2)} (P_1 + P_2) \quad (11)$$

جدول ۵ مقادیر دبی جرمی در دو حالت بدون توربین و با توربین (جهش فشاری صفر پاسکال)

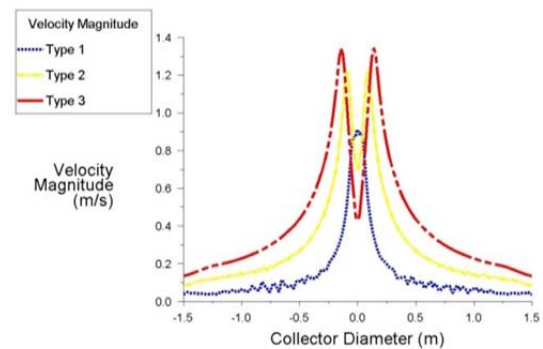
مدل	دبی جرمی (بدون توربین) Kg/s	دبی جرمی (با توربین) Kg/s	درصد خطا
۱	۰/۰۲۱۲	۰/۰۲۰۹	۱/۰۹
۲	۰/۰۵۸۴	۰/۰۵۸۰	۰/۷۴
۳	۰/۰۹۳۸	۰/۰۹۰۹	۳/۰۷
۴	۰/۰۲۳۹	۰/۰۲۳۶	۱/۰۷
۵	۰/۰۷۳۲	۰/۰۷۲۲	۱/۴۴
۶	۰/۱۰۵۴	۰/۱۰۶۷	۱/۲۷
۷	۰/۰۲۵۴	۰/۰۲۵۱	۱/۲۴
۸	۰/۰۷۲۱	۰/۰۷۱۷	۰/۶۲
۹	۰/۱۱۸۰	۰/۱۱۶	۰/۹۰



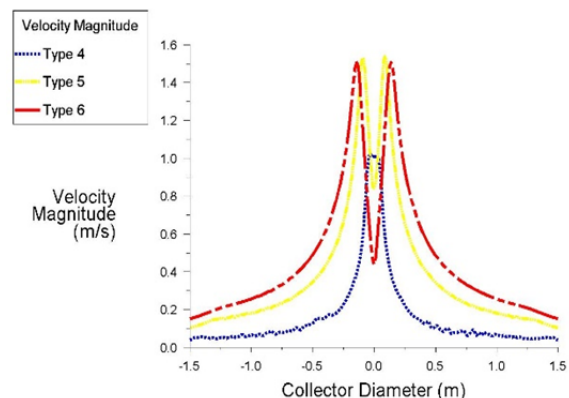
نمودار ۱۱ تغییرات توان خروجی توربین با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع دودکش ۲ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



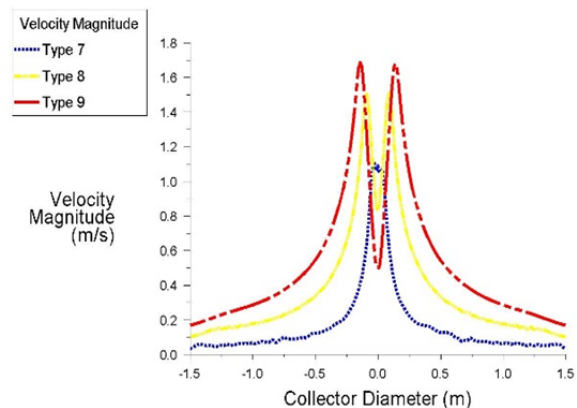
نمودار ۱۲ تغییرات توان خروجی توربین با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع دودکش ۳ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



نمودار ۸ تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع دودکش ۲ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



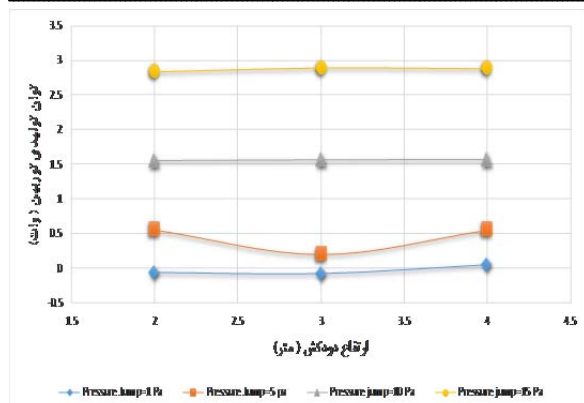
نمودار ۹ تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع دودکش ۳ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر



نمودار ۱۰ تغییرات سرعت دودکش خورشیدی با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع دودکش ۴ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی‌متر

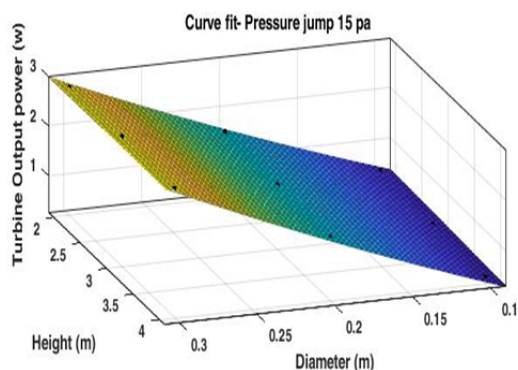
ارزیابی عملکرد سیستم با توربین

در ادامه با تعبیه یک توربین در پایه دودکش، نه تنها با جریان ورودی از کلکتور مخالفت شده بلکه با افزایش میزان جهش فشاری (Pressure Jump) توربین یک جریان معکوس نیز ایجاد شده است. جهت ارزیابی دقت مدل ایجادشده، ابتدا توربین با جهش فشاری صفر پاسکال مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت، مقادیر به‌دست آمده بایستی منطبق بر حالت بدون توربین بوده که با توجه به جدول ۵ این امر با دقت قابل قبولی صورت گرفته است. بر مبنای تطابق مناسب نتایج در دو حالت فوق، با افزایش مقادیر جهش فشاری برای توربین، نتایج به‌دست آمده آتی نیز با دقت مناسبی قابل استناد می‌باشند. بر این اساس، مطابق نمودارهای ۱۱،



نمودار ۱۶) تغییرات توان خروجی توربین با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۳۰ سانتی متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی متر

در ادامه در یک حالت خاص، مقادیر استخراج شده منحنی برازش بر اساس روش کمترین مربعات (Mean-Squared Method) برای جهش فشاری ۱۵ پاسکال مطابق شکل ۴ ارائه شده است که بر این اساس رابطه بین ارتفاع، قطر دودکش و توان تولیدی توربین نیز طبق رابطه (۱۲) قابل بیان می باشد.



شکل ۴) منحنی برازش بر اساس مقادیر به دست آمده برای جهش فشاری ۱۵ پاسکال.

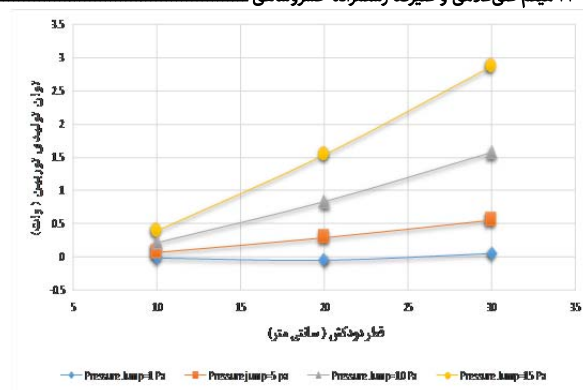
همچنین جدول ۶، به مقایسه مقادیر مستخرج از فرمول با مقادیر به دست آمده واقعی قبلی پرداخته که طبق این جدول معادله فوق با دقت مطلوبی قابل استناد است. به روش مشابه برای سایر جهش های فشاری نیز می توان رابطه مشابهی با دقت عملکرد قابل قبول ارائه داد.

$$\dot{W} = -0.4531 + 8.361D - 0.009785H + 7.796D^2 + 0.2511DH - 0.09003H^2 \quad (12)$$

جدول ۶) مقایسه مقادیر به دست آمده برای توان تولیدی توربین بین مدل سازی و معادله همبستگی برای جهش فشاری ۵ پاسکال

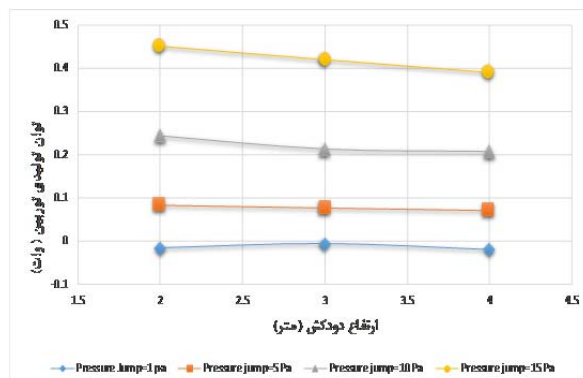
مدل	مقادیر واقعی	مقادیر تئوری	درصد خطا
۱	۰/۴۵۱	۰/۴۵۶	-۱/۰۶
۲	۱/۵۹۴	۱/۵۷۶	۱/۱۷
۳	۲/۸۳۸	۲/۸۵۲	-۰/۵۰
۴	۰/۴۱۹	۰/۴۲۶	-۱/۵۴
۵	۱/۵۶۵	۱/۵۷۱	-۰/۳۸
۶	۲/۸۸۵	۲/۸۷۲	۰/۴۲
۷	۰/۳۹۰	۰/۳۷۸	۲/۸۵
۸	۱/۵۳۶	۱/۵۴۹	-۰/۸۴
۹	۲/۸۷۷	۲/۸۷۵	۰/۰۵

در این مطالعه برای افزایش توان تولیدی دودکش خورشیدی،

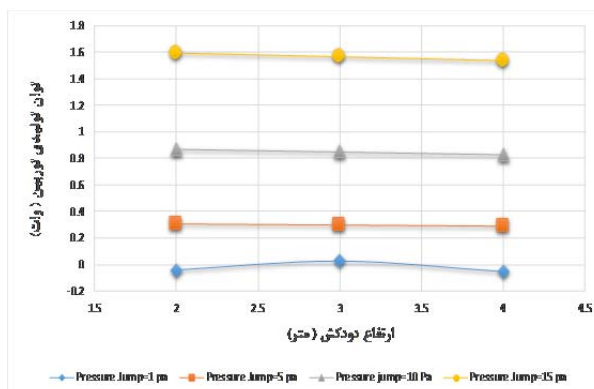


نمودار ۱۳) تغییرات توان خروجی توربین با قطر دودکش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی متر، ارتفاع دودکش ۴ متر و ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی متر

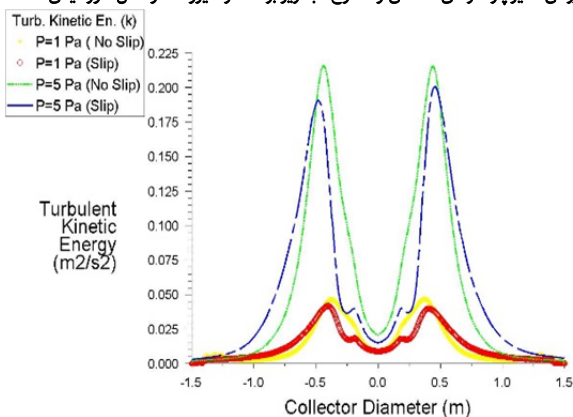
همچنین شایان ذکر است، مطابق نمودارهای ۱۴، ۱۵ و ۱۶ که بیانگر میزان تغییرات توان خروجی توربین در قطرهای ثابت و با ارتفاع های متفاوت است، عموماً یک روند نسبتاً نزولی با افزایش ارتفاع دودکش اتفاق می افتد. همان طور که پیش تر نیز ذکر شد با افزایش ارتفاع در قطر ثابت، دبی جرمی روندی صعودی دارد. بعلاوه با توجه به استفاده از توربین و به طبع آن به دلیل مخالفت با جریان، بدیهی است با افزایش ارتفاع، قدرت مکش جریان از خروجی دودکش توسط توربین پایین آمده و قدرت مخالفت با جریان اصلی نیز کاهش می یابد و در نتیجه طبق فرمول بیان شده جهت محاسبه توان تولیدی توربین مقادیر کمتری برای دبی جرمی ثبت شده است. از این رو با افزایش ارتفاع در قطر ثابت و در یک جهش فشاری ثابت، قدرت مکش توربین به شدت کاهش یافته و عملکرد سیستم نیز افت می کند.



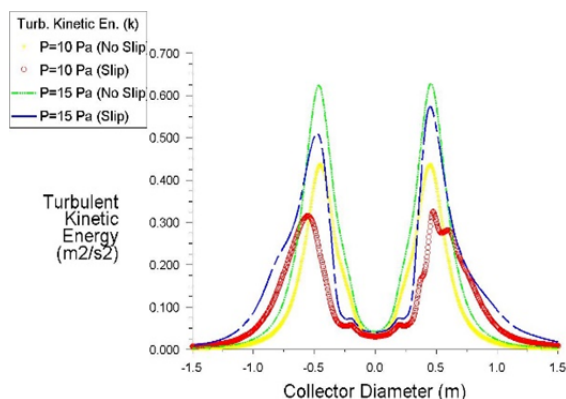
نمودار ۱۴) تغییرات توان خروجی توربین با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۱۰ سانتی متر و با ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی متر



نمودار ۱۵) تغییرات توان خروجی توربین با ارتفاع دودکش ۲، ۳ و ۴ متر، قطر دودکش ۲۰ سانتی متر و با ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی متر



نمودار ۱۸) تغییرات انرژی جنبشی توربولانسی مدل ۹ در دو حالت لغزش (آبگریز) و عدم لغزش (آبدوست) با جهش فشاری ۱ و ۵ پاسکال



نمودار ۱۹) تغییرات انرژی جنبشی توربولانسی مدل ۹ در دو حالت لغزش (آبگریز) و عدم لغزش (آبدوست) با جهش فشاری ۱۰ و ۱۵ پاسکال

در جدول ۷، نتایج مربوط به درصد بهبود توان تولیدی توربین با سطوح آبگریز نسبت به سطوح آبدوست ارائه شده است. همان طور که نتایج به دست آمده نشان می‌دهند، حدود ۵ درصد افزایش توان تولیدی توربین مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که درصد بهبود عملکرد سیستم در حالتی که از سطوح آبگریز استفاده می‌شود نسبت به مراجع اشاره شده در مقدمه، پایین‌تر می‌باشد که دلیل این امر در تفاوت نوع سیال مورد استفاده می‌باشد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، سیال مورد استفاده هوا می‌باشد، تنش برشی ناچیزی بین سیال با دیواره‌های صلب وجود دارد و در صورت استفاده از سطوح آبگریز، تغییر زیادی در تنش برشی ایجاد شده در سطوح مشاهده نمی‌شود.

جدول ۷) درصد بهبود توان تولیدی توربین در حالت آبگریز در جهش‌های فشاری مختلف برای مدل ۹

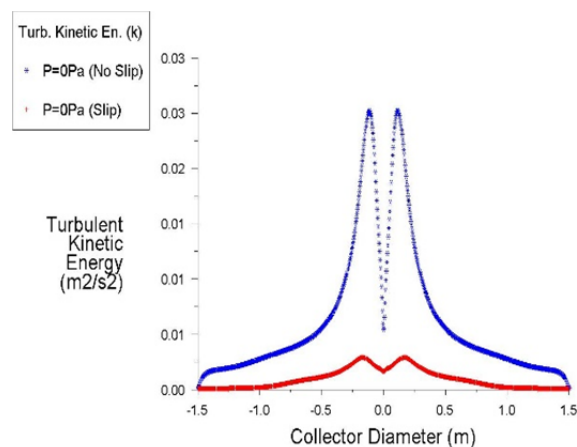
جهش فشاری (Pa)	۰	۱	۵	۱۰	۱۵
درصد بهبود	۰/۰۱	۰/۸۲	۴/۷۴	۴	۳/۴۲

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی میزان تأثیر پارامترهای هندسی بر توان تولیدی توسط توربین در یک دودکش خورشیدی پرداخته شد. بر این اساس، ۹ مدل مختلف با ارتفاع و قطر مختلف دودکش مدل‌سازی گردیده است. شبیه‌سازی با فرض میزان تشعشع ۸۵۰ وات بر متر مربع با دمای محیط ۳۰۲ کلوین انجام شده است.

میزان تأثیر شرایط مرزی در دیواره‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که پیش‌تر نیز اشاره گردید به دلیل شرط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها، سرعت جریان در سطح زمین برابر صفر بوده که این امر باعث ایجاد تنش برشی در سطح شده و منجر به افت فشار بالا در جریان عبوری می‌گردد. بنابراین جهت کاهش نیروی پسا، شرط مرزی لغزش با تعریف سطوح آبگریز در دیواره‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی دیواره آبگریز، مدل شماره ۹ در جهش‌های فشاری متفاوت بررسی شده و شرط لغزش در دیواره اعمال شده است که بر این اساس با مقایسه میزان دبی جرمی ورودی شاهد افزایش نسبی آن تا حدود ۵ درصد هستیم که این میزان از افزایش نسبت به کانال‌های بررسی‌شده توسط مطالعات انجام‌شده قبلی مذکور در قسمت مقدمه، کمتر می‌باشد. علت این امر در پایین‌بودن ویسکوزیته هوا در مقایسه با سایر سیال‌های عامل همانند آب و همچنین بالا بودن مقیاس جریان در سیستم دودکش خورشیدی است که در این جریان تنش‌های برشی بسیار جزئی در سطوح وجود دارد. با وجود تمام موارد ذکر شده، استفاده از سطوح آبگریز و یا به عبارتی بهره‌گیری از پدیده شرط لغزش در دیواره‌ها می‌تواند باعث افزایش عملکرد سیستم تا حدود ۵ درصد باشد. همچنین تعیین جهش فشاری بهینه با وجود شرط لغزش در سطوح مختلف قابل تعریف می‌باشد. به طوری که با افزایش میزان جهش فشاری از صفر تا ۵ پاسکال، افزایش دبی جرمی وجود داشته و افزایش بیش از آن موجب ایجاد اثر منفی در عملکرد سیستم می‌گردد که کاهش نسبی دبی جرمی را نیز به همراه دارد. لذا تعیین جهش فشاری بهینه در طراحی دودکش خورشیدی به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی این سیستم حائز اهمیت می‌باشد. همچنین با بررسی میزان انرژی جنبشی توربولانسی در جهش‌های فشاری متفاوت مشاهده می‌گردد که با توجه به نمودار ۱۷، در جهش فشاری صفر پاسکال آبگریز بودن سیال اثر منفی به لحاظ میزان انرژی توربولانسی داشته که در کل طول کانال مقادیر انرژی توربولانسی در حالت آبگریز کمتر از حالت آبدوست است.

نمودارهای ۱۸ و ۱۹ چگونگی اثر مثبت آبگریز نمودن سطوح در جهش‌های فشاری ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ پاسکال را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌گردد، میزان انرژی توربولانسی در نواحی نزدیک به توربین در حالت آبدوست بیشتر از حالت آبگریز بوده و سپس این روند معکوس می‌شود.



نمودار ۱۷) تغییرات انرژی جنبشی توربولانسی مدل ۹ در دو حالت لغزش (آبگریز) و عدم لغزش (آبدوست) با جهش فشاری صفر پاسکال

به دلیل ماهیت آشفته جریان، از مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ جهت مدل‌سازی استفاده شده است. در گام اول مقادیر به‌دست آمده توسط مقادیر مطالعات پیشین اعتبار سنجی شده و سپس بررسی در دو مرحله بدون توربین و با توربین که به روش فن معکوس مدل شده است، انجام شده است. بر این اساس جهت اطمینان از درستی روش فن معکوس، مقادیر دبی جرمی در حالت بدون توربین با مقادیر به‌دست آمده برای دبی جرمی در حالت فن معکوس با جهش فشاری صفر پاسکال مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین، تغییرات سرعت جریان ورودی برای تمامی مدل‌ها و بر اساس تغییر ارتفاع و یا قطر دودکش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با توجه به کاهش اثر دودکشی، افزایش ارتفاع دودکش همواره تأثیر مثبتی ندارد. همچنین مشاهدات تأکید بر اهمیت بالای قطر دودکش داشته است، به‌طوری که می‌توان قطر دودکش را به عنوان یکی از تأثیرگذارترین پارامترهای هندسی بر عملکرد سیستم معرفی کرد. همچنین با توجه به مقادیر به‌دست آمده، رابطه بین ارتفاع دودکش، قطر دودکش و توان تولیدی توربین قابل بیان می‌باشد که در یک حالت خاص، رابطه مذکور برای جهش فشاری ۱۵ پاسکال با خطای کمتر از یک درصد بیان شده است. در نهایت با اعمال شرط لغزش در سطوح مشاهده گردید، آب‌گریز نمودن سطوح تأثیر مثبتی بر عملکرد سیستم دارد. این در حالی است که میزان تأثیر آن در جهش‌های فشاری مختلف، متفاوت بوده و امکان تعیین یک حالت بهینه وجود دارد. لذا در این مطالعه، شرط لغزش به عنوان یکی از راهکارهای مناسب در جهت کاهش میزان پسای توربولانسی و بهبود عملکرد سیستم تا حدود ۵ درصد معرفی گردیده است.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
C_p	ضریب انبساط حرارتی ویژه ($J.Kg^{-1}.K$)
D	قطر کلکتور (m)
g	شتاب گرانش زمین ($m.s^{-2}$)
G_b	ضریب تولید انرژی جنبشی توربولانسی بر مبنای نیروی شناوری
G_k	ضریب تولید انرژی جنبشی توربولانسی بر مبنای حداقل گرادینان سرعت
Gr	عدد گراشهف
h	ارتفاع دودکش (m)
J	ژول
K	کلوین
k	انرژی جنبشی توربولانسی ($m^2.s^{-2}$)
L	طول (m)
m	متر
N	نیوتون
P	فشار ($kgm^{-1}.s^{-2}$)
Pa	پاسکال
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
s	ثانیه
$SCPP$	نیروگاه دودکش خورشیدی
V	سرعت ($m.s^{-1}$)
u	سرعت شعاعی ($m.s^{-1}$)
V	سرعت محوری ($m.s^{-1}$)

W	وات
$\dot{w}$	توان تولیدی توربین
ε	ضریب اتلاف انرژی جنبشی توربولانسی ($m^2.s^{-3}$)
λ	ضریب رسانش حرارتی ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
μ	لزجت دینامیکی ($Pa.s^{-1}$)
μ_t	لزجت توربولانسی ($Pa.s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg.m^{-3}$)
β	ضریب انبساط حرارتی
σ_s	عدد پرنتل توربولانسی برای ε
σ_k	عدد پرنتل توربولانسی برای k
زیرنویس‌ها	
b	نیروی شناوری
Ext	خروجی
$Stack$	دودکش
t	توربولانسی
1	ورودی توربین
2	خروجی توربین

منابع

- Ghalamchi M, Kasaeian A, Ghalamchi M, Hajiseyed Mirzahassemi AR. An experimental study on the thermal performance of a solar chimney with different dimensional parameters. *Renewable Energy*. 2016;91:477-483.
- Ghalamchi M, Kasaeian A, Ghalamchi M. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;43:425-431.
- Haaf W, Friedrich K, Mayr G, Schlaich J. Solar chimneys part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares. *International Journal of Solar Energy*. 1983;2(1):3-20.
- Haaf W. Solar chimneys part II: Preliminary test results from the Manzanares pilot plant. *International Journal of Solar Energy*. 1984;2(2):141-161.
- Sangi R, Amidpour M, Hosseiniadeh B. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*. 2011;85(5):829-838.
- Dehghani S, Mohammadi AH. Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants - a multi-objective optimization approach. *Solar Energy*. 2014;105:603-612.
- Patel SK, Prasad D, Rafiuddin Ahmed M. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant. *Energy Conversion and Management*. 2014;77:424-431.
- Vieira RS, Petry AP, Rocha LAO, Isoldi LA, Dos Santos ED. Numerical evaluation of a solar chimney geometry for different ground temperatures by means of structural design. *Renewable Energy*. 2017;109:222-234.
- Maia CB, Ferreira AG, Valle RM, Cortez MFB. Theoretical evaluation of the influence of geometric parameters and materials on the behavior of the airflow in a solar chimney. *Computers & Fluids*. 2009;38(3):625-636.
- Li JY, Guo PH, Wang Y. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*. 2012;47:21-28.
- Yoon M, Hwang J, Lee J, Sung HJ, Kim J. Large-scale motions in a turbulent channel flow with the slip