



## طراحی و تحلیل یک دودکش خورشیدی مقیاس کوچک با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

جاماسب پیرکندی<sup>۱\*</sup> و مهدی هاشم‌آبادی<sup>۲</sup><sup>۱</sup> استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴

## چکیده

در کار حاضر، یک دودکش خورشیدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحلیل و طراحی قرار گرفته است و ابعاد بهینه دودکش تعیین شده است. سطح مقطع دودکش خورشیدی به صورت مستطیلی در نظر گرفته شده است و مدل‌سازی به صورت سه‌بعدی انجام شده است. دودکش در ابعاد مختلف و با مقاطع هندسی گوناگون مدل شده است و اثر هندسه دودکش روی جریان هوای داخل و عملکرد آن، مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، علاوه بر اثر هندسه دودکش، اثر تغییر شار حرارتی دریافتی از محیط، فشار مثبت در دهانه ورودی و دمای هوای ورودی بر دبی هوای خروجی از دودکش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده وجود عرض بهینه به منظور بیشینه‌سازی دبی هوا در دودکش است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در شارهای حرارتی مختلف (۱۰۰ تا ۱۳۰۰ وات) و با افزایش عرض، دبی در واحد طول دودکش افزایش می‌یابد، اما این روند تنها تا عرض ۰/۲ متر ادامه پیدا می‌کند. پس از این نقطه با افزایش عرض، دبی کاهش پیدا می‌کند. علت این پدیده، ایجاد و گسترش جریان برگشتی است. افزایش سطح دهانه ورودی، افزایش فشار در دهانه ورودی و افزایش ارتفاع دودکش علاوه بر افزایش دبی و بهبود عملکرد، سبب افزایش عرض بهینه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** دودکش خورشیدی؛ تهویه طبیعی؛ دینامیک سیالات محاسباتی؛ هندسه بهینه.

## Design and Numerical Investigation of a Small Scale Solar Chimney using Computational Fluid Dynamics

J. Pirikandi<sup>1\*</sup>, M. Hashemabadi<sup>2</sup><sup>1</sup> Assist. Prof., Aerospace Eng., MalekAshtar Univ. of Technology, Tehran, Iran.<sup>2</sup> Ph.D Student., Aerospace Eng., MalekAshtar Univ. of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In the current study, a solar chimney is analyzed and designed using computational fluid dynamics (CFD). The optimal dimensions of the chimney is determined. The chimney has a rectangular cross section and it is modeled in three-dimensional space. The chimney has been modeled in various dimensions and with various geometric sections and impact of chimney geometries have been investigated on internal air flow and its performance. In addition to the geometry of the chimney effect, impact of change heat flux received from environment, entrance positive pressure and inlet air temperature were studied on outlet air mass flow rate from the chimney. The results indicated that there is optimum width in order to maximize air flow rate in the chimney. Optimum width is increased with Increase in inlet cross section, entrance pressure and chimney height in addition to increased air mass flow rate and performance improvement. The results of this plan can be used for appropriate design of a solar chimney and finally making it.

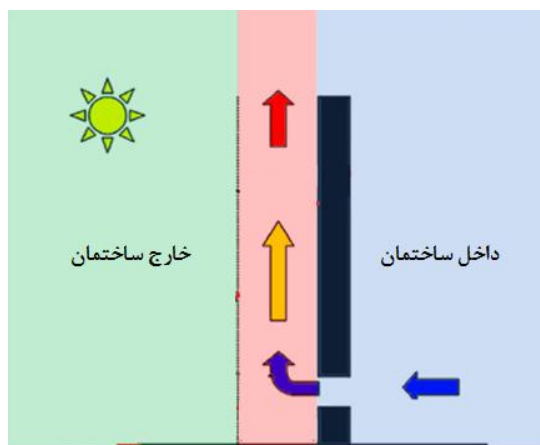
**Keywords:** Solar Chimney; Natural Ventilation; Computational Fluid Mechanics; Optimized Geometry.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۲۲۹۸۷۰۰۴

آدرس پست الکترونیک: [j\\_pirikandi@dena.kntu.ac.ir](mailto:j_pirikandi@dena.kntu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

حرارت تابشی و همرفت در دودکش خورشیدی به جابه‌جایی محسوس هوا و به دنبال آن بهبود تهویه می‌انجامد. دودکش خورشیدی، یک کانال هوایی ترموسیفون است که سازوکار اصلی محرک جریان هوا در آن شناوری گرمایی است [۴]. گوناگونی‌های زیادی در طراحی دودکش خورشیدی می‌توان یافت که تحت تأثیر عوامل متعددی همچون، مکان، اقلیم، جهت، اندازه فضای تهویه شده و بهره گرمای داخلی است [۵]. با این حال، عناصر اصلی همچون، کلکتور خورشیدی، پوشش شفاف و دهانه‌های ورودی و خروجی بخش‌هایی از هر طراحی‌اند (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک کارکرد دودکش خورشیدی در ساختمان [۶]

تقریباً همه مطالعات دودکش خورشیدی با هدف یافتن راهکارهای طراحی بهینه برای بهبود تهویه طبیعی و با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف طراحی انجام می‌شود. در میان بسیاری از پارامترهای گزارش شده در مقالات، مشخص شد که نسبت منطقی دودکش (ارتفاع دودکش به عرض شکاف هوا)، ارتفاع تهویه (ارتفاع میان دهانه‌های ورودی و خروجی)، مساحت دهانه‌ها، مشخصات گرمایی ماده‌ی جذبنده<sup>۵</sup> و زاویه‌ی شیب دودکش بر عملکرد تهویه بیش‌ترین تأثیر را دارند.

در بیشتر تحقیقات انجام شده برای دودکش‌های خورشیدی در اقلیم‌هایی با تابش ناکافی خورشید یا شار گرمایی نسبتاً پایین، نتایج مناسبی ارایه نشده است. در این

تهویه طبیعی، استراتژی مهمی در طراحی پایدار<sup>۱</sup> ساختمان است که قرن‌ها مورد استفاده بشر بوده، به علت مزایای بالقوه‌اش بر سیستم‌های تهویه مکانیکی از نظر انرژی مورد نیاز و منافع اقتصادی و زیست‌محیطی‌اش، توجه فزاینده‌ای به خود جلب کرده است. سیستم‌های تهویه مکانیکی، مصرف انرژی نامطلوبی دارند، چون برای کارکردن به برق بیش‌تری نیاز دارند. در برخی شهرها، تجهیزات تهویه مطبوع، تقریباً کل ظرفیت شبکه برق را مصرف می‌کنند [۱]. از سوی دیگر، انتظار می‌رود تهویه طبیعی، در شرایط مناسب اقلیمی و عملکردی، حدود ۱۰٪ در انرژی سرمایه‌ش و حدود ۱۵٪ در

برق مصرفی پروانه در سال صرفه‌جویی کند [۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تهویه طبیعی، به عنوان وسیله‌ای برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی و فراهم آوردن هوای باکیفیت و آسایش گرمایی کافی برای ساکنان داخل ساختمان‌ها، اداره‌ها و محیط‌های صنعتی، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است. تهویه طبیعی با شناوری گرمایی<sup>۲</sup> و با نیروی باد ایجاد می‌شود. تهویه با باد تنها به جهت باد و شدت باد وابسته است. این دو عامل، تصادفی<sup>۳</sup> می‌باشند و ملاحظات طراحی را چالش‌برانگیز و دشوار می‌کنند. از سوی دیگر، تهویه با شناوری به اختلاف دما بین داخل و خارج ساختمان و نیز بین نواحی مختلف داخل ساختمان بستگی دارد. این پدیده حتی در روزهای گرم و بی‌باد تابستانی نیز می‌تواند رخ بدهد. دودکش خورشیدی، نمونه فوق‌العاده‌ای است که برای بیشینه‌سازی اثر تهویه با بیشینه‌سازی بهره‌ی خورشیدی<sup>۴</sup> [۳] و در پی آن ایجاد اختلاف دمای کافی بین داخل و خارج ساختمان برای ایجاد نرخ مناسب جریان هوا، طراحی شده است. در روزهای گرم عادی تابستان، اختلاف دمای اندکی بین داخل و خارج ساختمان وجود دارد؛ در نتیجه نیروی گرمایی و در پی آن تهویه در دودکش متداول که بر اساس اصل تهویه دودکشی کار می‌کند، ناکافی است؛ در حالی که با استفاده از دودکش خورشیدی می‌توان با بیشینه‌سازی بهره خورشیدی اختلاف دمای کافی را ایجاد کرد. ترکیب انتقال

<sup>1</sup> Sustainable design

<sup>2</sup> Thermal Buoyancy

<sup>3</sup> Stochastic

<sup>4</sup> Solar gain

<sup>5</sup> Absorber

دست یافت. به تازگی، ایده تهویه خورشیدی-برج باد را نوآنگه و همکاران [۹]، به صورت عددی تحلیل کردند که در آن مسأله تهویه مخلوط در نظر گرفته شده بود. در سیستم پیشنهادی آن‌ها، همرفت اجباری در سیستم برج ناشی از فشار منفی ایجادشده در خروجی برج از اثر ونتوری و همرفت آزاد ناشی از اثر شناوری بود.

آرس و همکاران [۱۰]، عملکرد گرمایی دودکش خورشیدی را با مدل اندازه واقعی در روز و شب مدیترانه‌ای برای تهویه طبیعی بررسی کردند. دیواری از بتن مسلح به ارتفاع ۴/۵ m، پهنای ۱ m و ضخامت ۰/۱۵ m، به عنوان جذب کننده خورشیدی به کار رفت. سطح جنوبی دودکش مشکی مات رنگ شده، سطوح کناری و پشتی آن عایق‌بندی شده بود. دیوار جاذب با شیشه‌ای به ضخامت ۰/۰۰۴ m پوشانده شد تا از اتلاف گرمایی همرفت از دیواره جلوگیری شود. شکاف هوایی، ۰/۳ m عمق داشت و ارتفاع دودکش، ۳/۵ m با نسبت منظری تقریبی ۱۱ بود. با این پیکربندی، بیشینه نرخ جریان ۳۷۴ m<sup>3</sup>/h در شدت آفتاب ۶۰۴ W/m<sup>2</sup> گزارش شد. در این تحقیق، ضریب تخلیه<sup>۳</sup> با آزمایش به دست آمد تا محاسبات نرخ جریان حجمی انجام شود. مقدار به‌دست‌آمده ضریب تخلیه، حدود ۰/۹٪ کم‌تر از میزان پیشنهادی در مقالات بود. نتایج بدست آمده از این تحقیق، نشان داد که نرخ جریان هوا از سیستم دودکش خورشیدی بسیار تحت تأثیر اختلاف فشار بین دریچه‌ها بوده که این مسأله ناشی از گرادیان دما و سرعت باد است.

میزاکی و همکاران [۱۱]، به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، عملکرد گرمایی دودکش خورشیدی را برای یک اتاق اداری به مساحت کف ۳۶ m<sup>2</sup> از یک ساختمان یک‌طبقه به صورت عددی تحلیل کردند و تغییر بار گرمایی را در آن در نظر گرفتند. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده برای شکاف هوایی، ۰/۳ m تطابق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. نتایج این تحقیق نشان داد که برای طراحی در نظر گرفته شده دودکش خورشیدی، شکاف هوایی ۰/۳ m می‌تواند بیشترین تأثیر (نرخ تهویه) را با هزینه نسبتاً کم ایجاد کند. در بیشتر تحقیقات انجام شده برای دودکش‌های خورشیدی در اقلیم‌هایی با تابش ناکافی خورشید یا شار

تحقیق برخلاف سایر تحقیقات انجام شده، اثر چند پارامتر مختلف روی عملکرد دودکش خورشیدی بررسی شده است. هندسه دودکش، اثر تغییر شار حرارتی دریافتی از محیط، فشار مثبت در دهانه ورودی و دمای هوای ورودی از جمله پارامترهایی است که در این تحقیق، مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲-۱- مطالعه کارهای پیشین

بسیاری از کارهای پیشین روی تهویه طبیعی که بر اساس جریان باد و مربوط به بارگذاری آیرودینامیکی [۱] است، در تونل باد انجام شده است. با پیشرفت فناوری محاسباتی، مطالعات مشابه و پیچیده‌تری با استفاده از تکنیک‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. مطالعه اخیر نیکاس و همکاران [۷]، نشان داد که می‌توان اطلاعات سرعت القایی و میدان‌های فشار برای تهویه عبوری طبیعی را با مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به دست آورد.

تحقیقات پیشگام روی دودکش خورشیدی را بنسل و همکاران [۳] انجام دادند که ایده‌ای برای بهبود تهویه دودکشی بر اساس مدل ریاضی حالت پایدار<sup>۱</sup> پایه‌گذاری کردند. تحلیل‌های بازدهی برای مساحت کلکتور، ۲/۲۵ m<sup>2</sup> با اندازه مجرای ۱۵ cm برای مقادیر مختلف تابش خورشید انجام شد. نتایج نشان داد که در دماهای مختلف محیط برای تابش خورشید در بازه ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ W/m<sup>2</sup> می‌توان به نرخ (تهویه‌ی) جریان هوای القایی ۳۳۰-۱۴۰ m<sup>3</sup>/h دست یافت. در نتیجه، بنسل و همکاران [۸] برای تحقیق روی یک دودکش خورشیدی متصل به سیستم تهویه با برج باد<sup>۲</sup> (بادگیر)، به صورتی که دودکش‌های خورشیدی در انتهای دهانه‌های خروجی اتاق نصب شده و تأثیر دودکشی در برج باد ناچیز بود، از پیکربندی دودکش خورشیدی مشابهی استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد، دودکش خورشیدی متصل به برج باد می‌تواند نرخ جریان هوایی تا ۱/۴ kg/s در شدت آفتاب ۷۰۰ W/m<sup>2</sup> تولید کند؛ همچنین نشان داده شد که با نرخ جریان جرمی ۰/۷۵-۱/۳ kg/s برای سرعت باد ۱ m/s در محیط، می‌توان به تعویض هوای برابر با ۳۳-۳۵

<sup>۱</sup> Steady State

<sup>۲</sup> Wind Tower

<sup>۳</sup> Discharge Coefficient

مدل اغتشاشی  $k - \epsilon RNG$ ، یکی از مدل‌های بهبود یافته مدل  $k - \epsilon$  است و در این مدل، یک ترم به معادله  $\epsilon$  اضافه شده که دقت را برای جریان‌های اغتشاشی و چرخشی بالا می‌برد. این مدل برای عدد پراکتل اغتشاشی نیز، یک فرمول ارایه می‌دهد، در صورتی که در مدل استاندارد یک عدد ثابت است؛ همچنین این مدل، یک فرمول دیفرانسیلی تحلیلی برای ویسکوزیته موثر در رینولدزهای پایین ارائه می‌دهد که روش استاندارد فاقد توانایی ارائه جواب دقیق در این محدوده عدد رینولدز است. مراجع دیگری از قبیل مراجع [۵، ۱۸] نیز از این مدل آشفتگی استفاده شده است و میزان دقت آن مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده است که این مدل دارای دقت خوبی است. به همین دلیل از این مدل آشفتگی استفاده شده است. معادلات انتقال برای حالت کلی مدل  $(k - \epsilon)$  به شرح زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

در روابط بالا ترم  $(G_k)$ ، بیانگر نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته به علت گرادیان سرعت متوسط است.

### ۳- مدل‌سازی دودکش خورشیدی

#### ۳-۱- مدل‌سازی هندسی

هندسه استفاده شده در پروژه حاضر به شکل مکعب مستطیل است. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، دودکش دارای یک ورودی هوا در پایین و یک خروجی در قسمت بالا است. در فرآیند شبکه‌بندی در قسمت‌هایی از هندسه که تغییرات متغیرهای جریان بیشتر است (نزدیکی دیواره‌ها و ورودی جریان)، شبکه به اندازه کافی ریز انتخاب شده است تا فیزیک جریان به خوبی مدل شود. در دیگر نواحی، شبکه درشت‌تر انتخاب شده است تا از بار محاسباتی کاسته شود. سلول‌ها برای دودکش مستطیلی به صورت مکعب مستطیل انتخاب شده‌اند تا بهترین نتیجه بدست بیاید

گرمایی نسبتاً پایین، نتایج مناسبی ارایه نشده است. با این حال دروری و همکاران [۱۲]، نشان دادند که دودکش خورشیدی، حتی در شرایط شار گرمایی پایین (حدود  $50-60 \text{ W/m}^2$ )، توانایی تهویه خانه‌های کوچک را دارد. تهویه شبانه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای مورد توجه بسیاری بوده که با دودکش خورشیدی همراه با اینرسی گرمایی مناسب به دست می‌آید. یک مدل دینامیکی ریاضی برای چنین دودکش خورشیدی‌ای را مارتلی‌هررو و هراس‌سلمین [۱۳]، پیشنهاد و حل کرده‌اند. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات اصنافی [۱۴]، سنگی [۱۵]، قلمچی [۱۶] و رضایی [۱۷] اشاره کرد.

### ۲- معادلات حاکم

به منظور پیش‌بینی رفتار جریان‌های آشفته نیاز به مدل‌هایی است که با فیزیک مساله همخوانی داشته باشند و ضمن پیش‌بینی دقیق جریان تا حد امکان پیچیدگی‌های حل معادلات را کاهش دهند. مقادیر لحظه‌ای سرعت، فشار و دما  $(\bar{U}_i, \bar{P}, \bar{T})$  به دو بخش متوسط  $(U_i, P, T)$  و نوسانی  $(u_i, p, t)$  تقسیم‌بندی می‌گردد. با استفاده از این فرض در معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی و با متوسط‌گیری از این معادلات و فرض دائمی بودن جریان، روابط ناوبر-استوکس به صورت زیر به دست می‌آیند.

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

معادلات ممنتوم:

$$\frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

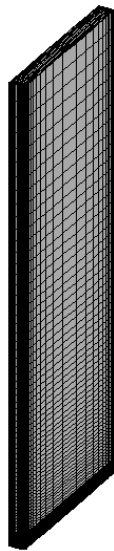
معادله انرژی:

$$U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u_j t} \right) \quad (3)$$

در معادلات بالا، تانسور مرتبه دوم  $\overline{u_i u_j}$  که تانسور تنش رینولدز نامیده می‌شود و بردار شار حرارتی مغشوش  $\overline{u_j t}$  به‌عنوان مجهول اضافی در معادلات جریان سیال وارد می‌شود. این تانسور تنش و بردار شار حرارتی مغشوش مجهول، توسط روش‌های مختلفی تقریب زده می‌شود که این روش‌ها را اصطلاحاً مدل‌سازی آشفتگی می‌نامند.

## جدول ۲- خواص هوا

مقدار	خاصیت
۱/۲۰۴	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۱۰۰۶/۴۳	گرمای ویژه ( $\text{J/kg.K}$ )
۰/۰۲۵۵۹۶	رسانش گرمایی ( $\text{W/m.K}$ )
$۱/۸۲۰۵ \cdot ۱۰^{-۵}$	ویسکوزیته ( $\text{kg/m.s}$ )
۰/۰۰۳۴۱۱۲	ضریب انبساط حرارتی ( $1/\text{K}$ )



شکل ۳- نمونه ساختار شبکه‌بندی مدل دودکش با سطح مقطع مستطیلی

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج به دست آمده از تحلیل دودکش خورشیدی نمونه ارایه شده است. برای این کار، ابتدا مساله استقلال نتایج از شبکه بررسی شده است. در ادامه نیز، نتایج به دست آمده در مقایسه با کارهای مشابه اعتبارسنجی گردیده است. در انتهای مقاله نیز، نتایج مختلف این شبیه‌سازی ارایه شده، همچنین تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد نهایی دودکش خورشیدی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۴-۱- اعتبارسنجی

قبل از استخراج نتایج، باید از عدم وابستگی نتایج به شبکه‌بندی اطمینان حاصل کرد. برای همین منظور در شکل ۴، نمودار دبی جرمی در واحد طول برحسب اختلاف

و معادلات بقا با کمترین باقی‌مانده ارضا شوند. نمونه شبکه مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۳ نشان داده شده است.

## ۳-۲- شرایط مرزی و اولیه

شرط اولیه برای تمامی متغیرها (به غیر از دما)، مقدار صفر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در دیواره‌ها، به صورت شرط عدم لغزش و دمای ثابت و در ورودی و خروجی دودکش فشار ثابت در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در مساله اصلی، عدم لغزش و شار حرارتی ثابت انتخاب شده است. این انتخاب، به این دلیل است که دیواره جلویی دودکش شیشه‌ای بوده، نور خورشید رو از خود عبور می‌دهد. نور عبوری با برخورد به دیواره پشتی، سبب افزایش دمای آن و در نتیجه انتقال گرما به هوای داخل دودکش می‌شود؛ بنابراین شار حرارتی غیر صفر برای دیواره پشتی و شار حرارتی صفر برای دیگر دیواره‌ها منظور شده است. جدول ۱، تشریح کاملی از شرایط کاری و مرزی مدل پایه را ارایه می‌دهد.

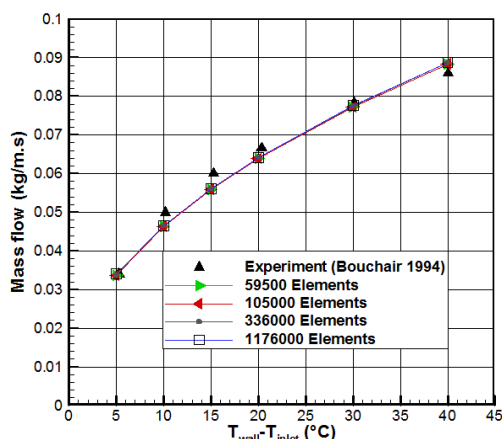
علاوه بر شرایط مرزی، پارامترهای عددی مساله نیز همچون، خواص فیزیکی هوا باید تعیین شود. این مقادیر در جدول ۲ ارایه شده است.

## جدول ۱- شرایط مرزی و کاری مورد استفاده در مدل‌سازی

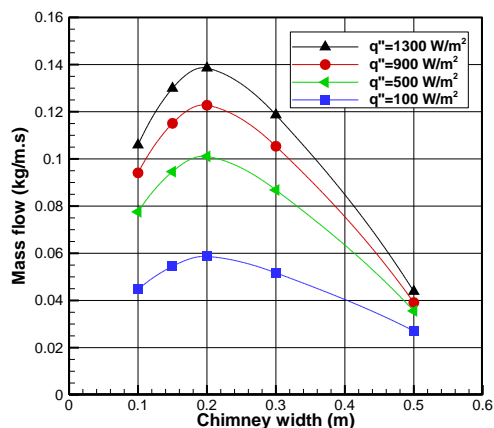
مقدار	خاصیت
۰	فشار ورودی و خروجی (پاسکال)
۲۰	دمای ورودی هوا (درجه سلسیوس)
۱۰۱۳۲۵	فشار کاری (پاسکال)



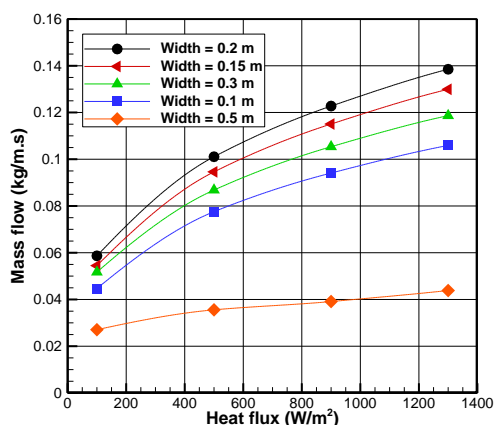
شکل ۲- موقعیت ورودی و خروجی هوا در دودکش از نمای جانبی



شکل ۴- استقلال نتایج از شبکه برای دودکش به ارتفاع ۳ متر، ورودی ۰/۱ متر و عرض ۰/۱ متر



شکل ۵- اثر شار حرارتی و عرض دودکش بر دبی جریان در دودکش ۳ متری



شکل ۶- اثر عرض دودکش و شار حرارتی بر دبی جریان در دودکش ۳ متری

دمای دیواره و محیط برای شبکه‌بندی‌های مختلف ارایه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، شبکه‌های انتخاب شده برای مدل‌سازی مناسب بوده، می‌توان اطمینان حاصل کرد که نتایج، مستقل از شبکه هستند. دلیل انطباق نتایج شبکه‌های مختلف این است که در تمامی آن‌ها سلول‌های نزدیک دیواره به خوبی زیرلایه لزوج را مدل می‌کنند که این موضوع در جریان آشفته بسیار حائز اهمیت است. برای این پروژه، از شبکه با ۱۰۵۰۰۰ المان استفاده شده است.

گام بعد از ایجاد هر مدل، تأیید و تصدیق آن براساس اصول محاسباتی و ریاضی است. تأیید مدل، حاکی از قابلیت اطمینان آن، برای تطبیق شرایط واقعی با استفاده از تحلیل محاسباتی است. برای انجام مقایسه بین نتایج مدل‌سازی فعلی با نتایج به دست آمده از سایر کارها، باید شرایط اولیه و مرزی را با آن تطبیق داد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده شد، با افزایش دمای دیواره‌ها دبی جریان نیز، افزایش پیدا می‌کند که این افزایش منطبق با نتایج گزارش شده توسط بوچر [۱۸] است. برای اطمینان از صحت نتایج عددی در مدل‌سازی جریان‌های آشفته، باید شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره به اندازه کافی ریز باشد. این موضوع با بررسی کمیت  $y^+$  انجام می‌شود که عددی بی بعد است. مقدار عددی  $y^+$  در تمام نقاط، کوچکتر از ۵ و در محدوده مجاز است؛ بنابراین می‌توان از حل درست فیزیک جریان مطمئن بود.

#### ۴-۲- اثر شار حرارتی

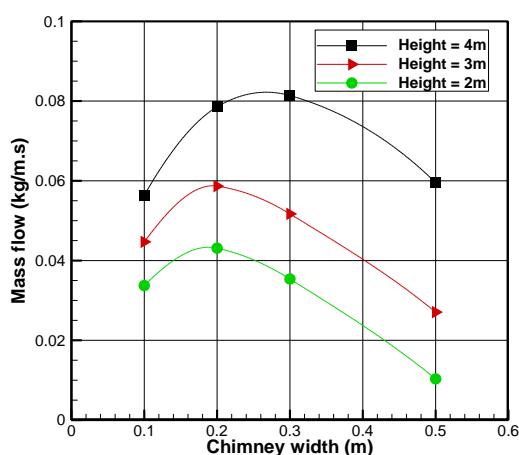
برای بررسی این موضوع، با ثابت نگه داشتن تمامی متغیرها برای مدل پایه عرض دودکش از ۰/۱ متر تا ۰/۵ متر و شار حرارتی از ۱۰۰ تا ۱۳۰۰ وات بر متر مربع تغییر داده شد. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، در ابتدا با افزایش عرض، دبی در واحد طول دودکش افزایش می‌یابد، اما این روند تنها تا عرض ۰/۲ متر ادامه پیدا می‌کند. پس از این نقطه با افزایش عرض، دبی کاهش پیدا می‌کند. علت این پدیده، ایجاد و گسترش جریان برگشتی است.

افزایش شار حرارتی دبی جریان را زیاد می‌کند که این مساله، به دلیل افزایش نیروی شناوری است. در شکل ۶، مشخص است که افزایش شار بیشترین تأثیر را در عرض بهینه داشته، کمترین تأثیر را زمانی دارد که جریان برگشتی به بیشترین حد خود رسیده است. در واقع اثر عرض دودکش

### ۴-۳- اثر ارتفاع دودکش

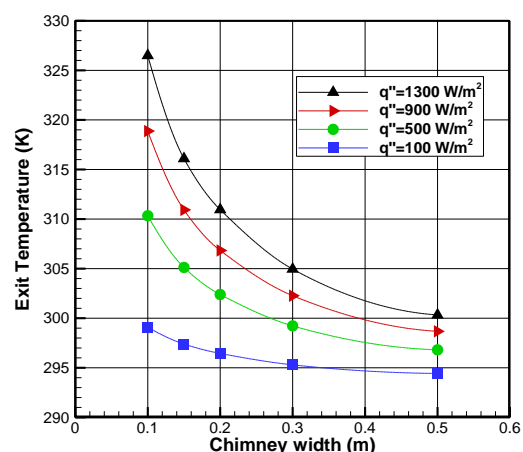
یکی از مهمترین متغیرهای اثرگذار بر دبی، ارتفاع دودکش است. برای بررسی این موضوع، با ثابت نگه داشتن شار حرارتی در ۱۰۰ وات بر مترمربع، اثر ارتفاع ۲، ۳ و ۴ متری دودکش مطالعه شد. با افزایش ارتفاع و در نتیجه افزایش سطح انتقال حرارت، هوای داخل دودکش گرمای بیشتری جذب کرده، چگالی آن افزایش بیشتری می‌یابد که این مساله منجر به افزایش نیروی شناوری و دبی می‌شود (شکل ۹). نکته قابل توجه در شکل ۹، تغییر نقطه عرض بهینه از ۰/۲ متر به ۰/۳ متر است. وابستگی عرض بهینه به ارتفاع دودکش، موضوعی است که محققان دیگر نیز به آن اشاره کرده‌اند و مقدار بهینه برای نسبت ارتفاع به عرض را عدد ۱۰ گزارش کرده‌اند. البته این عدد یک تخمین است؛ زیرا آنطور که در ادامه این تحقیق مشاهده می‌شود، متغیرهای دیگری بر عرض بهینه تاثیرگذار هستند.

در شکل ۱۰، اثر عرض و ارتفاع دودکش بر دمای خروجی برای شار حرارتی ۱۰۰ وات بر متر مربع ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع دمای هوای خروجی نیز افزایش می‌یابد، اما این افزایش در مقابل اثر شار حرارتی ناچیز است. برای توضیح این موضوع، باید به این نکته توجه داشت که افزایش انتقال حرارتی که با افزایش ارتفاع و سطح حرارت در این مساله صورت گرفته است، بسیار کمتر از افزایش حرارت ناشی از ازدیاد شار حرارتی در قسمت قبل است.

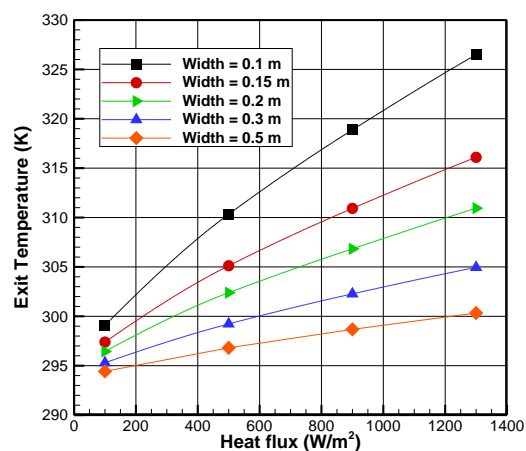


شکل ۹- اثر ارتفاع و عرض دودکش بر دبی برای شار حرارتی ۱۰۰ وات بر مترمربع

بر دبی در شارهای بالای حرارتی محسوس‌تر است. نتایج نشان می‌دهد که اثر تابش بر دبی بصورت مجانبی بوده، شیب تغییرات دبی برحسب تابش همواره افت می‌کند. مشخصه دیگری از دودکش که مورد مطالعه قرار می‌گیرد، دمای خروجی هواس است. در شکل‌های ۷ و ۸، اثر شار حرارتی و عرض دودکش بر دمای خروجی دودکش ارایه شده است. دمای خروجی دودکش برحسب کلوین نشان داده شده، هرچه گرمای انتقالی به هوا بیشتر باشد، این دما نیز بیشتر خواهد بود. ضمن اینکه وقتی دودکش باریک‌تر است و هوا بیشترین تماس را با دیواره‌ها دارد، دمای هوا بیشترین افزایش را تجربه می‌کند و اثر شار محسوس‌تر می‌شود. در دو نمودار ارایه شده، ارتفاع دودکش به اندازه ارتفاع یک ساختمان و ۳ متر در نظر گرفته شده است.



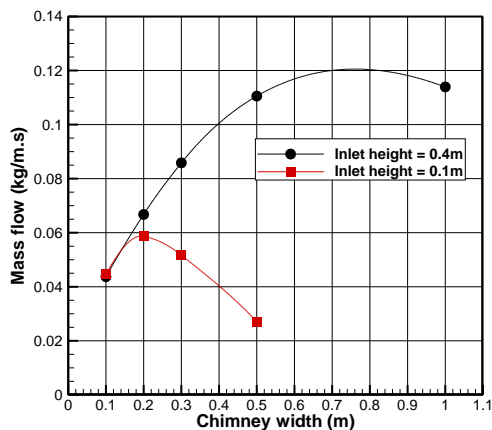
شکل ۷- اثر عرض دودکش بر دمای خروجی



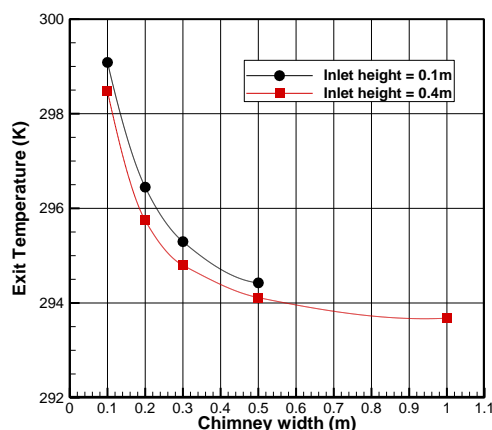
شکل ۸- اثر شار حرارتی دودکش بر دمای خروجی

پیش‌بینی شده است. نکته مهمی که باید به آن توجه شود، این است که افزایش دمای ورودی، منجر به کاهش چگالی هوا و در نتیجه کاهش دبی هوا می‌شود.

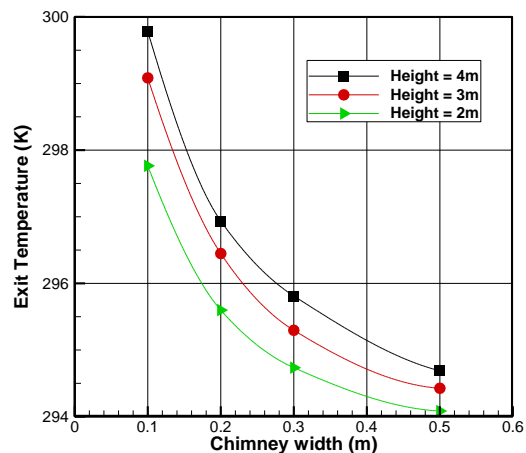
در شکل ۱۳، اثر تغییر دمای ورودی بر دودکش روی دبی هوای داخل آن مشاهده می‌شود. در این تحقیق، دمای ورودی به دودکش در محدوده ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است که البته شرایط راحتی افراد داخل یک فضا، در محدوده ۲۲ تا ۲۸ درجه سانتی‌گراد است. همانطور که مشاهده می‌شود، این کاهش دبی چندان محسوس نیست؛ بنابراین می‌توان از نتایج حاصل برای پیش‌بینی عملکرد دودکش در مناطقی استفاده کرد که دمای ورودی هوا متغیر است.



شکل ۱۱- اثر ارتفاع دریچه ورودی بر عرض بهینه و دبی در دودکش ۳ متری



شکل ۱۲- اثر ارتفاع دریچه ورودی بر عرض بهینه و دمای خروجی در دودکش ۳ متری



شکل ۱۰- اثر ارتفاع و عرض دودکش بر دمای خروجی برای شار حرارتی ۱۰۰ وات بر مترمربع

#### ۴-۴- اثر ارتفاع دریچه ورودی

یکی دیگر از متغیرهای مورد بررسی ارتفاع دریچه ورودی و به بیان دیگر، میزان در دسترس بودن هوا در ورودی جریان است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع دریچه ورودی از ۰/۱ به ۰/۴ متر، دبی جریان افزایش قابل توجهی داشته است؛ همچنین نقطه بهینه عرض، تغییر بسیار چشمگیری داشته است که این موضوع اهمیت در دسترس بودن هوای ورودی در عملکرد بهینه دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد. اثر مثبت این موضوع، زمانی بیشتر جلب توجه می‌کند که کاهش شار حرارتی به علت کاهش سطح دیواره گرما دهنده برای ورودی وسیع‌تر مد نظر باشد. شار حرارتی برای دریچه با ارتفاع ۰/۱ متر برابر ۲۹۰ وات و برای دریچه با ارتفاع ۰/۴ متر برابر ۲۶۰ وات است. در شکل ۱۲ نیز، اثر ارتفاع دریچه ورودی بر دمای خروجی دودکش قابل مشاهده است. افزایش ارتفاع دریچه ورودی، سبب کاهش دمای گازه‌های خروجی از دودکش خواهد شد. در دو شکل، شار حرارتی ۱۰۰ وات بر مترمربع منظور شده است.

#### ۴-۵- اثر دمای ورودی

تغییر شرایط دمای داخل فضا سبب می‌شود که دمای ورودی به دودکش، به عنوان یک پارامتر مهم مورد بررسی قرار گیرد. تغییر شرایط دمای داخل فضا، ناشی از شرایط آسایش داخل فضا بوده، تابعی از کاربری فضا است. برای فضاهای مختلف ساختمان طبق جداول استاندارد، شرایط راحتی مختلفی



۱۵ و ۱۶، نتایج حاصل از بررسی این موضوع برای مقادیر مختلف فشار مثبت در ورودی دریچه هوا نشان داده شده است.

در شکل ۱۵، اثر فشار مثبت دهانه ورودی روی دبی هوای عبوری در دودکش ۳ متری با شار حرارتی ۱۰۰ وات بر مترمربع نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش فشار نه تنها سبب افزایش کارایی و دبی جریان هوای عبوری در دودکش می‌شود، بلکه مقدار عرض بهینه دودکش را هم افزایش می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان سطح مقطع دودکش را افزایش داده، به نرخ دبی بالاتر رسید. در شکل ۱۶ نیز، اثر فشار مثبت بر دمای خروجی دودکش با همان شرایط کاری نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشخص است، در مقابل تاثیر قابل توجه فشار بر دبی، دمای خروجی دودکش، تغییرات محسوسی نسبت به تغییر فشار از خود نشان نمی‌دهد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده در این مقاله، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان جمع‌بندی بحث ارائه کرد:

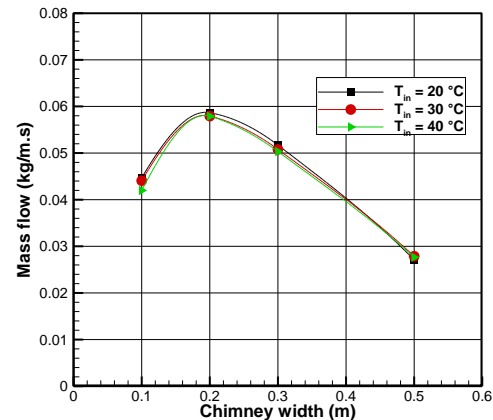
- با بررسی تاثیر عرض دودکش، ثابت شد که عملکرد مدل برای مجموعه مشخصی از پارامترهای ثابت، در عرض خاصی بهتر است. علت وجود عرض بهینه، این است که در ابتدا با افزایش عرض، سطح مقطع افزایش یافته و دبی بیشتر می‌شود، اما پس از نقطه بهینه، افزایش عرض منجر به ایجاد جریان برگشتی در خروجی دودکش می‌شود که این موضوع دبی را کاهش می‌دهد.

- بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش شار حرارتی، سبب افزایش دبی شده، بیشترین تاثیر افزایش شار در عرض بهینه و کمترین تاثیر آن هنگام وجود جریان برگشتی است.

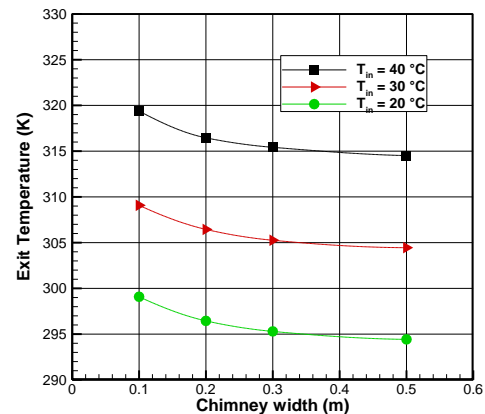
- دبی جریان با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد که این به دلیل افزایش حرارت دریافتی دودکش است. نکته قابل توجه، تغییر نقطه دبی بهینه همزمان با افزایش ارتفاع دودکش است.

- مقایسه نتایج به دست آمده از تغییر ارتفاع دریچه ورودی، نشان می‌دهد که این پارامتر در افزایش دبی و همچنین جابجایی قابل توجه عرض بهینه بسیار موثر است. لازم به ذکر است که افزایش دبی در اینجا در حالی رخ می‌دهد که سطح موثر گیرنده حرارت کاهش یافته است.

در شکل ۱۴ نیز، اثر تغییرات دمای ورودی بر دودکش بر روی دمای هوای خروجی از آن مشاهده می‌شود. با افزایش دمای هوای ورودی به دودکش، دمای گازهای خروجی از آن نیز افزایش پیدا خواهد کرد. در دو شکل ارائه شده، شار حرارتی ۱۰۰ وات بر متر مربع منظور شده است.



شکل ۱۳- اثر دمای ورودی بر دبی در دودکش ۳ متری



شکل ۱۴- اثر دمای ورودی بر دمای خروجی در دودکش ۳ متری

#### ۴-۶- اثر فشار مثبت در دهانه ورودی

سیستم‌های تهویه در ساختمان‌ها با توجه به اختلاف فشار داخل نسبت به خارج ساختمان به سه دسته، فشار مثبت، فشار خنثی (بالانس) و فشار منفی تقسیم می‌شوند. با توجه به نحوه عملکرد دودکش خورشیدی انتظار می‌رود وجود فشار مثبت در داخل ساختمان (استفاده از سیستم‌هایی با قدرت دمش هوای بیرون به داخل مانند هواساز، کولر آبی، ایرواشر و ...)، سبب بهبود کارایی دودکش شود. در شکل‌های

[3] Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS (1993) Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Build Environ* 28(3): 373-377.

[4] Gan G (2006) Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energ Buildings* 38(5): 410-420.

[5] Harris DJ, Helwig N (2007) Solar chimney and building ventilation. *Appl Energ* 84(2): 135-146.

[6] Baharvand E (2010) How to model a wall solar chimney. Department of Architecture, Building and Planning, Unit Building Physics and Systems, Technical University of Eindhoven.

[7] Nikas K, Nikolopoulos SN, Nikolopoulos A (2010) Numerical study of a naturally cross-ventilated building. *Energ Buildings* 42(4): 422-434.

[8] Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS (1994) A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Build Environ* 29(4): 495-500.

[9] Nouanégué HF, Alandji LR, Bilgen E (2008) Numerical study of solar-wind tower systems for ventilation of dwellings. *Renew Energ* 33(3): 434-443.

[10] Arce J, Jiménez MJ, Guzmán JD, Heras MR, Alvarez G, Xamán J (2009) Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renew Energ* 34(12): 2928-2934.

[11] Miyazaki T, Akisawa A, Kashiwagi T (2006) The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate. *Renew Energ* 31(7): 987-1010.

[12] Drori U, Dubovsky V, Ziskind G (2005) Experimental verification of induced ventilation. *J Environ Eng-Asce* 131(5): 820-826.

[13] Martí-Herrero J, Heras-Celemin MR (2007) Dynamic physical model for a solar chimney. *Sol Energy* 81(5): 614-622.

[14] Asnaghi A, Ladjevardi SM (2012) Solar chimney power plant performance in Iran. *Renew Sustainable Energ R* 16(5) 3383-3390.

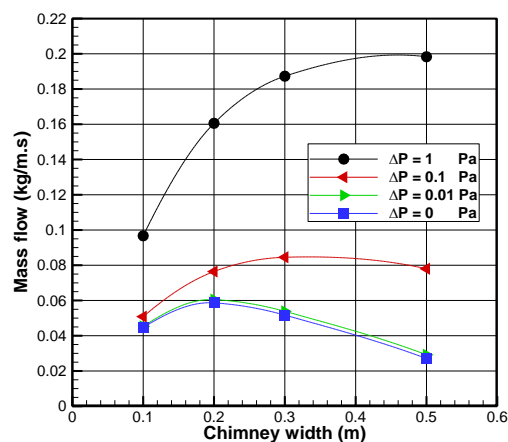
[15] Sangi R (2012) Performance evaluation of solar chimney power plants in Iran. *Renew Sustainable Energ R* 16(1) 704-710.

[16] Ghalamchi, M, Kasaeian A, Ghalamchi M (2015) Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renew Sustainable Energ R* 425-431.

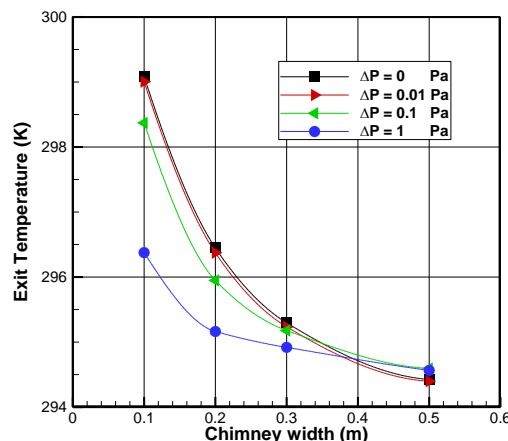
[17] Amir Rezaei S, Imani H (2015) Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. *Energ Convers Manage* 95: 446-452.

[18] Bouchair A (1994) Solar chimney for promoting cooling ventilation in southern Algeria. *Build Serv Eng Res Technol* 15(2): 81-93.

- در حالی که دمای ورودی هوا در عملکرد دودکش تاثیر چندانی ندارد، اما فشار مثبت ورودی در افزایش دبی و همچنین جابجایی نقطه عرض بهینه بسیار موثر است.



شکل ۱۵- اثر فشار مثبت دهانه ورودی بر دبی در دودکش ۳ متری



شکل ۱۶- اثر فشار مثبت بر دمای خروجی در دودکش ۳ متری

## ۶- مراجع

[1] Linden PF (1999) The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu Rev Fluid Mech* 31(1): 201-238.

[2] Emmerich SJ, Dols WS, Axley JW (2001) Natural ventilation review and plan for design and analysis tools. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.