

## Numerical Investigation of Design and Solar Irradiance Parameters on the Performance of a Solar Chimney System

Arash Nourbakhsh<sup>1</sup>, Seyyed Kazem Yekani<sup>2\*</sup>, Mahdi Nami Khalilehdeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Phd student, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Email: a\_nourbakhsh@tabrizu.ac.ir)

<sup>2</sup> Assistant Professor, University of Tabriz, Tabriz, Iran (\*Correspondence: s.k.yekani@tabrizu.ac.ir)

<sup>3</sup> Phd student, University of Tabriz, Tabriz, Iran (Email: mahdi.nami@tabrizu.ac.ir)

### ARTICLE INFO

*Article history:*

Article Type: Research paper

Received: 22 November 2025

Received in revised form: 20  
January 2026

Accepted: 02 February 2026

Available online: 20 February  
2026

\*Correspondence:

s.k.yekani@tabrizu.ac.ir

*Keywords:*

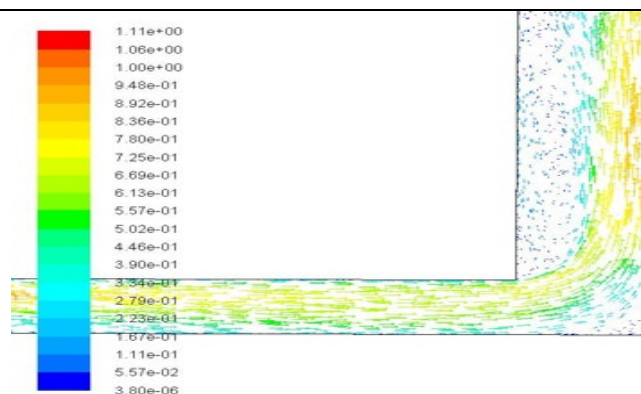
Solar chimney

Geometrical parameters

Solar irradiance

Computational fluid dynamics

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ABSTRACT

The increasing global demand for energy and the need for sustainable ventilation solutions highlight the importance of solar chimney systems as a passive and environmentally compatible technology. In the present study, the thermal and hydrodynamic performance of a solar chimney with a horizontal absorber surface is numerically investigated under the influence of geometric design parameters and solar radiation intensity. Numerical simulations were performed using ANSYS Fluent based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) framework, and the RNG k- $\epsilon$  turbulence model was employed to capture the airflow behavior. The governing continuity, momentum, and energy equations were solved using the finite volume method, and the numerical model was validated against available experimental data. The effects of chimney height (0.5–2.5 m), air channel gap (0.1 and 0.2 m), inlet and outlet dimensions, and solar radiation intensity (600, 800, and 1000 W/m<sup>2</sup>) on the system performance were examined. The results indicate that increasing the solar radiation intensity from 600 to 1000 W/m<sup>2</sup> leads to approximately a 40% enhancement in the mass flow rate. Moreover, increasing the chimney height from 1.0 to 2.5 m and widening the air channel gap from 0.1 to 0.2 m improve system performance by about 35% and 50%, respectively. A key contribution of this study is the identification of a recirculating flow phenomenon at the chimney outlet, which occurs at a critical ratio of the outlet height to air gap spacing ( $H_{out}/G=1.26-1.6$ ). This recirculation significantly reduces the system efficiency, decreasing the thermal performance from approximately 90% to nearly 30%. The findings demonstrate that avoiding these critical geometric ratios and optimizing the outlet configuration are essential for maximizing the efficiency of solar chimney systems. The results of this study provide practical guidance for the optimal design of solar chimneys, particularly in hot and arid climatic regions.

**Cite this article:** Nourbakhsh A<sup>®</sup>, Yekani S K, nami khalilehdeh M. Numerical Investigation of Design and Solar Irradiance Parameters on the Performance of a Solar Chimney System. Fluid Mechanics & Aerodynamics. 2026;14(2): 123- 136

Dor: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1405.15.1.3.3>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

**Publisher:** Imam Hossein Comprehensive University.





## مطالعه عددی تأثیر عامل‌های طراحی و تابش خورشید بر کارایی سیستم دودکش خورشیدی

آرش نوربخش سعدآباد<sup>۱</sup>، سید کاظم یکانی<sup>۲\*</sup>، مهدی نامی خلیله ده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران a\_nourbakhsh@tabrizu.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول: s.k.yekani@tabrizu.ac.ir)

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران mahdi.nami@tabrizu.ac.ir

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱ آذر ۱۴۰۴

بازنگری: ۳۰ دی ۱۴۰۴

پذیرش: ۱۳ بهمن ۱۴۰۴

ارائه آنلاین: ۰۱ اسفند ۱۴۰۴

\*نویسنده مسئول:

s.k.yekani@tabrizu.ac.ir

### کلید واژه‌ها:

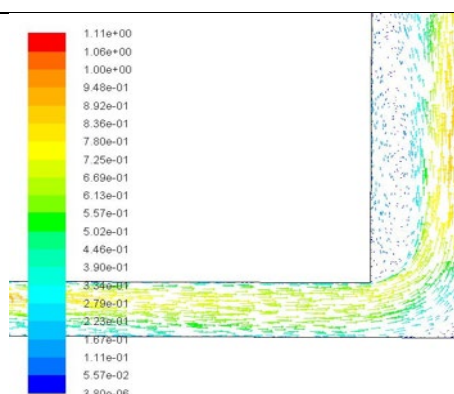
دودکش خورشیدی

عامل‌های هندسی

تابش خورشیدی

دینامیک سیالات محاسباتی

### چکیده گرافیکی



### چکیده

افزایش نیاز به انرژی و ضرورت بهره‌گیری از سامانه‌های کم‌مصرف، توجه به استفاده از دودکش‌های خورشیدی را به‌عنوان روشی پایدار برای تهویه و تولید جریان طبیعی هوا ضروری ساخته است. در پژوهش حاضر، عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی یک دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی تحت تأثیر عامل‌های هندسی و شدت تابش خورشیدی به‌صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار آنسیس فلونت بررسی شده است. مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG برای تحلیل جریان به کار گرفته شده و معادلات حاکم با روش حجم محدود حل گردیده است. ارتفاع دودکش (۰٫۵ تا ۲٫۵ متر)، فاصله کانال هوایی (۰٫۱ و ۰٫۲ متر)، ابعاد ورودی و خروجی و شدت تابش خورشیدی (۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع) به‌عنوان متغیرهای طراحی مورد مطالعه قرار گرفته و مدل عددی با داده‌های تجربی موجود اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش شدت تابش از ۶۰۰ به ۱۰۰۰ وات بر مترمربع سبب افزایش حدود ۴۰ درصدی دبی جرمی شده و افزایش ارتفاع دودکش و فاصله کانال به ترتیب موجب بهبود ۳۵ و ۵۰ درصدی عملکرد سامانه می‌گردد. از یافته‌های نوآورانه این پژوهش، شناسایی پدیده جریان بازگشتی در ناحیه خروجی است که در نسبت بحرانی ارتفاع خروجی به فاصله شکاف هوایی ( $H_{out}/G=1.26-1.6$ ) رخ داده و باعث کاهش بازده سامانه از حدود ۹۰٪ به نزدیک ۳۰٪ می‌شود. بر اساس نتایج، اجتناب از نسبت‌های بحرانی و بهینه‌سازی هندسه خروجی نقش کلیدی در افزایش راندمان و جلوگیری از افت عملکرد دودکش خورشیدی دارد. این نتایج می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی بهینه دودکش‌های خورشیدی در اقلیم‌های گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد.

**استناد:** نوربخش سعدآباد آرش<sup>۱</sup>، یکانی سیدکاظم، نامی خلیله ده مهدی، مطالعه عددی تأثیر پارامترهای طراحی و تابش خورشید بر کارایی سیستم دودکش خورشیدی. مکانیک سیالات و آیرودینامیک. ۱۴۰۴؛ ۱۴(۲): ۱۳۶-۱۲۳.

Dor: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1405.15.1.3.3>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



## ۱-مقدمه

با گسترش روزافزون صنایع و مصرف انرژی، همراه با افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و وابستگی شدید به منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت‌های فسیلی، چالش‌های جدی جهانی پدید آمده‌اند. از آنجاکه چرخه بازتولید این منابع در طبیعت بسیار طولانی است، استفاده بهینه و صرفه‌جویانه از انرژی اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این راستا، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی عملکرد، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و صرفه‌جویی در زمان انجام آزمایش‌های تجربی، نقش مهمی ایفا می‌کنند [1,2].

از سوی دیگر، در اقلیم گرم و خشک ایران، استفاده از روش‌های غیرفعال تهویه هوا سابقه‌ای طولانی دارد و نشان‌دهنده‌ی هوشمندی معماری سنتی در تطابق با شرایط اقلیمی است [3]. مطالعه دقیق و علمی این راهکارهای بومی، می‌تواند زمینه‌ای برای احیاء و به‌کارگیری مؤثر آن‌ها در قالب فناوری‌های نوین فراهم آورد و نقشی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کند. یکی از این روش‌های غیرفعال برای تهویه هوا در ساختمان‌ها، فضاهای مسکونی یا تجاری، و نیز کاربردهای صنعتی [4]، دودکش‌های خورشیدی هستند. دودکش‌های خورشیدی به دلیل مزایای بالقوه‌ای نظیر هزینه ساخت پایین، عدم نیاز به انرژی برق یا سوخت‌های فسیلی، و نیز عدم انتشار دی‌اکسیدکربن، باهدف تهویه در ساختمان‌ها و فضاهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در محیط‌های صنعتی مانند سالن‌های تولید با بار حرارتی بالا، انبارها، سردخانه‌ها، یا کارگاه‌های بزرگ، سیستم دودکش خورشیدی می‌تواند جریان هوای طبیعی را تقویت کند، مصرف فن‌ها و تهویه مکانیکی را کاهش دهد، کیفیت هوای محیط را بهبود ببخشد و شرایط کاری را ارتقا دهد. این کاربرد صنعتی غالباً مستلزم طراحی بزرگ‌تر، مقاومت بیشتر در برابر شرایط محیطی شدید، و اغلب ترکیب با سیستم تهویه مکانیکی یا مبادله‌گرهای حرارتی کمکی است [5-7].

دودکش خورشیدی با استفاده از انرژی خورشید، هوای داخل خود را گرم کرده و با کاهش چگالی، جریان صعودی هوا ایجاد می‌کند. این جریان باعث تهویه طبیعی ساختمان می‌شود. اختلاف دمای داخل و بیرون نقش مهمی در کارایی آن دارد. ساختار اصلی آن شامل کانالی با دیواره شیشه‌ای و سطح جذب‌کننده است که تابش خورشید را جذب و هوا را گرم می‌کند؛ در نتیجه، تهویه یا حتی تولید انرژی ممکن می‌شود [8].

دودکش‌هایی با کانال هوایی عمودی، و دودکش‌هایی با کانال هوایی شیب‌دار (که شیب نسبت به سطح افق می‌تواند از صفر تا ۹۰ درجه متغیر باشد)، به‌منظور افزایش راندمان جذب حرارت و بهبود نرخ تهویه، معمولاً دیواره‌ای که بیشترین دریافت تابش خورشید را در طول روز دارد، از جنس شیشه انتخاب می‌شود؛

سطوح داخلی سایر دیوارها با رنگ‌های تیره پوشانده می‌شوند تا جذب حرارت افزایش یابد، درحالی‌که سطح بیرونی آن‌ها عایق کاری می‌گردد تا از اتلاف گرما جلوگیری شود. این ترکیب طراحی، شرایطی بهینه برای انتقال حرارت تشعشعی و جابه‌جایی طبیعی فراهم می‌آورد. در طراحی دودکش خورشیدی، عوامل متعددی باید مدنظر قرار گیرند، از جمله شرایط اقلیمی منطقه، موقعیت جغرافیایی، جهت‌گیری مناسب نسبت به خورشید، ابعاد سازه و ویژگی‌های ساختمان میزبان یا فضای صنعتی [9].

نخستین پژوهش‌ها در زمینه دودکش‌های خورشیدی در سال ۱۹۹۳ میلادی توسط بنسال و همکارانش [10] صورت گرفت. آن‌ها با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی، اثبات کردند که استفاده از دودکش خورشیدی منجر به افزایش قابل‌توجه کارایی تهویه طبیعی می‌شود. این مطالعه نقطه آغازینی برای توسعه مفهومی و کاربردی این فناوری در حوزه تهویه ساختمان‌ها به شمار می‌آید. چن و همکاران [11] به‌صورت تجربی به مطالعه دودکش خورشیدی با کانال عمودی پرداختند و به این نتیجه رسیدند میزان فاصله هوایی بیشترین تأثیر را بر دبی جرمی هوا دارد. اوانگ و همکاران [12] به‌صورت تحلیلی روی بازده دودکش خورشیدی مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی از عوامل تأثیرگذار بر بازده دودکش خورشیدی است. بانسال و همکاران [13] با استخراج مدل ریاضی دودکش‌های خورشیدی با ابعاد نسبتاً کوچک در مقایسه نتایج خود با تحقیقات تجربی پیشین به این نتیجه رسیدند که امکان استفاده از دودکش‌های خورشیدی با ابعادی در حدود پنجره یک‌خانه امکان‌پذیر است و با طراحی بهینه می‌توان سرعت هوا در این دودکش‌ها را تا ۰٫۲۴ متر بر ثانیه بالا برد. ادام و همکاران [14] به‌صورت عددی و تجربی به بررسی تأثیر زاویه دودکش خورشیدی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییر زاویه در دبی جریان عامل مؤثر است و شرایط بهینه را تعیین نمودند. شیء و همکاران [15] در یک مقاله مروری با مطالعه ساختارهای مختلف دودکش خورشیدی در موقعیت‌های جغرافیایی گوناگون به مهم‌ترین عامل‌های مؤثر بر بازده دودکش خورشیدی که به ۴ اصل حائز اهمیت از جمله عامل‌های طراحی، مواد استفاده شده، موقعیت نصب و شرایط محیطی منطقه دست یافتند. زاوالا و همکاران [16] با مطالعه تجربی دودکش خورشیدی واقع شده در سقف ساختمان جهت انجام یک بررسی آماری کلی، به این نتیجه رسیدند که عملکرد دودکش‌های خورشیدی تابع زمان است به‌طوری‌که بازده دودکش در ماه‌هایی از سال (در حوالی ماه ژوئیه) به حداکثر مقدار خود می‌رسد و در سایر زمان‌ها این بازده به دلیل تغییر زاویه تابشی خورشید متغیر است. همچنین آنها نتیجه گرفتند دودکش خورشیدی ساخته شده توسط آنها برای تهویه فضای ۵۳ مترمکعب کافی است.

در مطالعاتی دیگر مربوط به استفاده از دودکش خورشیدی

هندسی دودکش برای دستیابی به حداکثر بازده تأکید دارد. نگوئن و همکارانش [23] با انجام مطالعه تجربی در یک‌خانه خورشیدی که از فتاوری دودکش خورشیدی برای مصارف گرمایش، سرمایش و تهویه در فصول مختلف سال استفاده می‌کرد ظرفیت هوایی دودکش‌های خورشیدی را به‌وسیله مدل ریاضی و اندازه‌گیری‌های تجربی اعتبارسنجی کردند. حیدری و فخاری [24] دودکش‌های خورشیدی را در یک ساختمان چندطبقه مقایسه کردند و نتیجه گرفتند با افزایش عمق دودکش (فاصله شکاف هوایی) نرخ دبی جرمی هوای خروجی افزایش می‌یابد. ثقفی و فخاری [25] دودکش‌های خورشیدی را در اقلیم‌های مختلف ایران با یکدیگر مقایسه کرده و با مطالعه دقیق‌تر چند شهر واقع در یک اقلیم نتیجه گرفتند دودکش خورشیدی در اقلیم گرم و خشک ایران بالاترین بازده را دارد. آنها دریافتند عملکرد دودکش خورشیدی در اقلیم‌های مختلف متفاوت است. بررسی‌های انجام شده بر روی سه شهر اصفهان، تبریز و بندرعباس با سه اقلیم مختلف نشان داد در شهر اصفهان بیشترین و در شهر بندرعباس کمترین نرخ جریان حجمی هوا اتفاق می‌افتد. بر همین اساس نرخ جریان حجمی هوا، نرخ تهویه و دمای هوای خروجی دودکش در اقلیم‌های مختلف متفاوت است.

باوجود مطالعات متعدد انجام‌شده در زمینه دودکش‌های خورشیدی، بررسی رفتار جریان و عملکرد دودکش‌های خورشیدی با سطح جاذب افقی، به‌ویژه در ناحیه خروجی، همچنان محدود باقی‌مانده است. به‌طور خاص، پدیده جریان بازگشتی در خروجی و نسبت‌های هندسی بحرانی مؤثر بر آن، تاکنون به‌صورت کمی و نظام‌مند گزارش نشده‌اند. براین‌اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل عددی جریان بازگشتی، استخراج نسبت‌های بحرانی هندسی و بررسی اثر آن‌ها بر دبی جرمی و بازده حرارتی، تلاش می‌کند این خلأ پژوهشی را پوشش دهد. اهداف اصلی شامل استخراج مؤثرترین عامل‌های هندسی مؤثر بر ایجاد جریان بازگشتی در ناحیه خروجی دودکش، محاسبه بیشینه بازده عملکرد سیستم با تغییر این عامل‌ها، و تعیین نسبت بحرانی ارتفاع خروجی به فاصله شکاف هوایی است که در آن جریان بازگشتی پدیدآمده و موجب افت بازدهی سیستم می‌گردد. همچنین، روند تغییرات عرض خروجی بحرانی با تغییر ارتفاع خروجی در شرایط ثابت‌بودن فاصله شکاف هوایی بررسی شده است.

## ۲- هندسه مورد مطالعه

در مطالعه حاضر، یک دودکش خورشیدی با سطح جذب‌کننده افقی و بدون توربین بادی مطابق شکل (۱) جهت تهویه هوا اتاق با استفاده از انرژی تجدیدپذیر و همیشه در دسترس خورشیدی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. هندسه مورد مطالعه به‌صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. یک دودکش خورشیدی با سطح جذب‌کننده افقی شامل یک کانال هوایی بین یک شیشه و

جهت تهویه هوای ساختمان‌ها خداری و همکارانش [17] به‌صورت تجربی به مطالعه تأثیر دودکش خورشیدی بر تهویه هوای یک اتاق با حجم ۲۵ مترمکعب پرداختند و مشاهده کردند که وقتی سیستم تهویه دودکش خورشیدی مورداستفاده قرار می‌گیرد، دمای اتاق نزدیک به هوای محیط می‌شود و این نشان‌دهنده توانایی خوب دودکش خورشیدی برای کاهش گرمای خانه و تهویه مطلوب است. همچنین آنها به این نتیجه رسیدند که باز کردن پنجره به‌جای استفاده از دودکش‌های خورشیدی کارایی کمتری دارد، چون تفاوت دما بین اتاق و محیط کم است. ساندافورن و بوندیت [18] در یک مطالعه تجربی، تأثیر دودکش خورشیدی را بر بهبود تهویه داخلی در شرایط مختلف، با و بدون بهره‌گیری از سامانه خنک‌کننده، مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش، جریان هوای عبوری از دودکش از روی یک صفحه فلزی خنک عبور داده شد که در سمت دیگر آن سیالی نظیر آب جریان داشت، به‌طوری‌که باعث کاهش دمای هوا می‌شد. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از دودکش خورشیدی می‌تواند بسته به شرایط محیطی از جمله دمای هوا و شدت تابش خورشیدی، دمای داخلی ساختمان را بین ۱ تا ۳٫۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد.

میاژاکی و همکارانش [19] در یک مطالعه تجربی، عملکرد یک دودکش خورشیدی را در یک ساختمان اداری مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که بهره‌گیری از تهویه طبیعی حاصل از دودکش خورشیدی می‌تواند منجر به کاهش مصرف روزانه انرژی الکتریکی تا حدود ۳۹ درصد در برخی ماه‌های سال شود. این کاهش مصرف انرژی بیانگر نقش مؤثر دودکش‌های خورشیدی در بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها است.

همچنین، چاروات و همکارانش [20] با بررسی اثر ویژگی‌های حرارتی اجزای دودکش خورشیدی دریافتند که افزایش جرم حرارتی در ناحیه صفحه جاذب می‌تواند موجب افزایش ۲۵ درصدی سرعت جریان هوا در طول روز گردد. این نتایج بر اهمیت طراحی بهینه سامانه‌های ذخیره حرارتی در ارتقای عملکرد دینامیکی دودکش‌های خورشیدی تأکید دارند. فونیاسومین و همکارانش [21] نیز در یک پژوهش ترکیبی تجربی و عددی، عملکرد دودکش خورشیدی را در یک ساختمان چندطبقه مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در صورتی‌که دودکش خورشیدی به‌صورت مستقل به هر طبقه متصل شود، کارایی کلی سیستم تهویه طبیعی به شکل چشمگیری بهبود می‌یابد.

در مطالعه‌ای دیگر، چن و همکارانش [22] به بررسی تأثیر فاصله هوایی و زاویه تمایل دودکش نسبت به سطح افقی سقف پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیشینه نرخ جریان جرمی هوا زمانی حاصل می‌شود که زاویه تمایل دودکش ۴۵ درجه، فاصله شکاف هوایی ۲۰۰ میلی‌متر، و ارتفاع سیستم برابر با ۱٫۵ متر باشد. این یافته‌ها بر ضرورت بهینه‌سازی عامل‌های

### شرایط مرزی:

شرط مرزی ورودی و خروجی دودکش خورشیدی به ترتیب از نوع pressure inlet و pressure outlet با فشار نسبی صفر (فشار اتمسفریک) در نظر گرفته شده است. دمای هوای ورودی به محفظه دودکش مقدار ثابت 300 کلوین فرض شده است.

سطح جاذب با فرض اعمال شار حرارتی یکنواخت و ثابت، متناظر با انرژی تابشی جذب شده از خورشید در یک بازه زمانی مشخص، با مقادیر ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع مدل سازی شده است. به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و با توجه به پایین بودن دمای دیواره ها، انتقال حرارت تشعشعی بین سطح جاذب و صفحه شیشه ای در شبیه سازی لحاظ نشده است.

برای دیواره شیشه ای، در نسخه بازنگری شده مقاله، انتقال حرارت جابه جایی با محیط بیرون در نظر گرفته شده و شرط مرزی از نوع جابه جایی با دمای محیط ۳۰۰ کلوین و ضریب انتقال حرارت  $h_{out} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$  اعمال گردیده است. سایر دیواره های خارجی و داخلی، به جز سطح جاذب، به صورت عایق حرارتی فرض شده اند، زیرا میزان انتقال حرارت از این سطوح در مقایسه با شار حرارتی اعمال شده ناچیز است.

شرط عدم لغزش برای تمامی دیواره ها اعمال شده و اثر زبری دیواره ها بر افت فشار و مشخصه های جریان هوا نادیده گرفته شده است. عدد رایلی در تمامی حالات مورد بررسی در بازه  $10^{10}$  تا  $10^{12}$  قرار دارد که نشان دهنده حاکم بودن رژیم جریان آشفته ناشی از شناوری در دامنه محاسباتی است.

### ۳- معادلات حاکم بر مسئله:

رژیم جریان سیال با توجه به بازه عدد رایلی به صورت متلاطم است و شبیه سازی عددی به صورت دوبعدی صورت گرفته است، زیرا محاسبات دوبعدی قادر به تولید مقادیر آماری جریان در خواص چون سرعت و دمای دودکش های باریک هستند. جریان هوا درون دودکش تراکم ناپذیر فرض شده و برای تغییر چگالی سیال، تقریب بوزینسک با فرض عدم اختلاف دمای بالای سیال بین ورودی و خروجی برای دودکش خورشیدی در نظر گرفته شده است.

معادلات (RANS) در شبیه سازی به صورت زیر به کار گرفته شده اند:

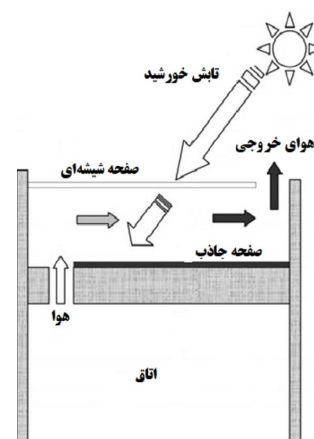
$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

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

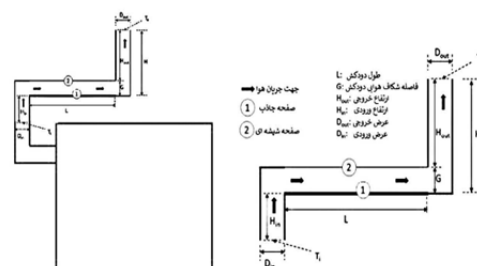
$$\frac{\partial (T U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu}{pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - T' \overline{u_j} \right) \quad (3)$$

یک سطح جاذب است که ابعاد اصلی (ابعاد تأثیرگذار در بازده دودکش و مشخصه های جریان سیال) با جزئیات آن در شکل (۲) نشان داده شده است. انتقال گرما از سطح جذب کننده به هوای داخل کانال باعث افزایش دمای هوا و کاهش چگالی آن می شود. در صورتی که نیروی شناوری ایجاد شده بر اثر افزایش دمای هوا و اختلاف چگالی بتواند بر نیروهای لزجی و سایر نیروها غلبه کند، یک جریان هوایی درون دودکش ایجاد می شود که ناحیه مکش آن (ورودی دودکش) می تواند به خانه ها یا ساختمان ها جهت تهویه هوا متصل شود. البته در کاربردهای عملی، هنگامی که دودکش در یک ساختمان ادغام می شود، دیواره های عمودی بخش های ورودی و خروجی نیز می توانند به عنوان سطوح جذب کننده باشند تا جاذب انرژی خورشید حداکثر شود.

به عنوان نمونه ای از کاربرد عملی، بخش ورودی دودکش پیشنهاد شده می تواند درون یک لوله تهویه متصل به ساختمان باشد و سطح جذب کننده افقی روی سقف صاف قرار داده شود. در این مطالعه، دبی جرمی جریان هوایی ایجاد شده درون دودکش خورشیدی و کارایی حرارتی آن توسط یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان تابعی از ابعاد دودکش در شار حرارتی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد بررسی شده شامل: طول دودکش L، فاصله کانال هوایی G، ارتفاع ورودی، ارتفاع خروجی، عرض ورودی و عرض خروجی است.



شکل (۱): نمای شماتیک یک دودکش خورشیدی نصب شده بر سقف یک ساختمان



شکل (۲): جزئیات نزدیک از ابعاد هندسی یک دودکش با سطح جاذب افقی

جدول (۱): خواص فیزیکی هوا در دمای ۳۰۰ درجه کلوین

| category | $\mu(\frac{kg}{m.s})$ | $K(\frac{W}{m.K})$ | $C_p(\frac{J}{kg.K})$ | $\rho(\frac{kg}{m^3})$ |
|----------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| Air      | $\times 10^{-5}$      | 0.0263             | 1007                  | 1.1614                 |
|          | 1.846                 |                    |                       |                        |

## کمیت‌های بی بعد

اعداد بی بعد حاکم بر مسئله نیز از طریق روابط زیر محاسبه می‌شود [32,33]:

$$Ra = \frac{g\beta q H^4}{\nu \alpha k} \quad (۶)$$

در رابطه فوق  $g$  شتاب گرانشی زمین،  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی هوا،  $q$  شار حرارتی سطح جاذب  $H$  اختلاف ارتفاع بین ورودی و خروجی دودکش  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک،  $\alpha$  ضریب پخش حرارتی و  $k$  هدایت گرمایی هوا است.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{en})L^3}{\nu^2} \quad (۷)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۸)$$

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (۹)$$

باتوجه به اینکه در مطالعه حاضر مقدار نسبت  $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$  است، لذا سهم عمده انتقال حرارت مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی است؛ لذا معیار تعیین میزان آشفتگی صرفاً عدد رایلی است.

بازده حرارتی دودکش که رابطه‌ای از میزان شار گرمایی دریافتی هوا در طول کانال هوایی دودکش خورشیدی و شار گرمایی سطح جاذب است به‌عنوان یک مقدار جهت ارزیابی بازده دودکش‌های خورشیدی است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \frac{Q_o}{Q_i} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{\dot{m} C_p (T_o - T_i)} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{Q_i} \quad (۱۰)$$

$$T_o = \frac{1}{A} \int T \cdot dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n T_i |A_i|$$

که در رابطه فوق دبی جرمی خروجی دودکش با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \int_0^{D_{out}} \rho U \cdot dA = \int \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \\ &= \sum_{i=1}^n \rho_i \vec{v}_i \cdot \vec{A}_i \end{aligned} \quad (۱۱)$$

در مطالعه حاضر، راندمان حرارتی دودکش خورشیدی به‌صورت نسبت انرژی گرمایی حمل‌شده توسط جریان هوا به شار حرارتی اعمال‌شده بر سطح جاذب تعریف می‌شود. دمای ورودی و خروجی هوا بر اساس میانگین‌گیری وزنی با دبی جرمی از سطوح ورودی و خروجی استخراج شده‌اند. راندمان حرارتی به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p (T_{out,mw} - T_{in,mw})}{q'' A_{abs}} \quad (۱۲)$$

$\eta$  راندمان حرارتی دودکش خورشیدی،  $\dot{m}$  دبی جرمی جریان

که در آن مقادیر  $i$  و  $j$  نشان‌دهنده مؤلفه‌های عمودی و افقی،  $U$ ،  $u$  به ترتیب سرعت متوسط و سرعت نوسانی،  $T$  و  $T'$  و به ترتیب دمای متوسط و دمای نوسانی،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی هوا،  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک،  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی و  $Pr$  عدد پرانتل است. خط ممتد روی مقادیر بیانگر میانگین زمانی عامل‌ها است.

معادلات مربوط به مدل متلاطم  $k-\epsilon$  RNG نیز به‌صورت زیر است: (۴ و ۵)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon$$

که در روابط فوق  $G_k$  نشان‌دهنده انرژی جنبشی توربولانسی تولید شده به دلیل گرادیان سرعت،  $G_b$  نشان‌دهنده انرژی جنبشی توربولانسی تولید شده به دلیل وجود نیروی شناوری،  $Y_M$  نشان‌دهنده سهم اتساع نوسان در تلاطم قابل فشردگی به میزان اتلاف کلی است.

## ۴-روش حل عددی

جریان سیال غیر قابل تراکم، پایا و متلاطم است و اثرات گرانشی نیز وارد محاسبات شده است. معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار تجاری و حجم محدود فلوئنت، گسسته‌سازی و حل شده‌اند. معیار همگرایی نیز برای معادلات پیوستگی، سرعت  $10^{-6}$  و برای معادله انرژی  $10^{-8}$  قرار داده شده است.

نظر به اینکه در شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم انتخاب مدل مناسب جهت رسیدن به نتایج صحیح دارای اهمیت فراوانی است؛ مطالعات قبلی نشان داده است که مدل‌های رایج RANS از قبیل  $k-\epsilon$ ،  $k-w$ ، SST و نیز  $k-\epsilon$  RNG با تقریب مناسبی می‌تواند برای مسئله به کار گرفته شود. همچنین گان [26-28] نشان داد که هر دو مدل استاندارد  $k-\epsilon$  و  $k-w$  RNG برای مدل‌هایی با عدد رایلی حدود  $10^{11}$  تا  $10^{12}$  نتایج یکسانی می‌دهد. باتوجه به اینکه در این شبیه‌سازی بازه عدد رایلی بین  $10^{11}$  تا  $10^{12}$  است. از مدل متلاطم  $k-\epsilon$  RNG برای محاسبات مربوط به تنش و شار حرارتی آشفته (که ترم‌های آن در فرمول‌های ۱ تا ۳ موجود است) استفاده شده است. همچنین برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE و برای جملات جابه‌جایی از طرح فراباد مرتبه دوم استفاده شده است به جز برای فشار که در آن Body Force Weighted برده شده است. در مرحله پس‌پردازش نتایج، دمای ورودی و خروجی جریان هوا از طریق میانگین‌گیری جرمی بر روی مرزهای pressure inlet و pressure outlet استخراج شده است تا تأثیر توزیع غیریکنواخت سرعت و دما در مقطع خروجی لحاظ گردد.

## خواص فیزیکی سیال

جدول (۱) خواص فیزیکی هوا را نشان می‌دهد.

تشکیل نواحی جریان بازگشتی در خروجی دودکش می‌شود. در نتیجه، تمام شار حرارتی اعمال شده به افزایش انرژی گرمایی مفید جریان هوا تبدیل نمی‌شود.

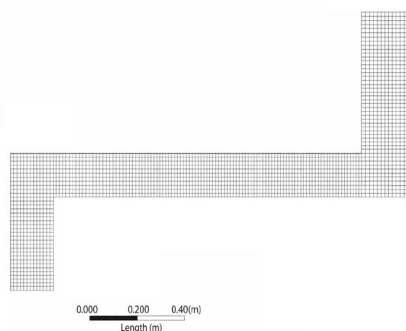
### شبکه‌بندی

دامنه محاسباتی به صورت شبکه غیریکنواخت دوبعدی با المان‌های چهارضلعی تولید شده است. باتوجه به اینکه در مطالعه حاضر رژیم جریان سیال به صورت متلاطم است و شبیه‌سازی عددی این نوع جریان به مدت، اندازه، دقت و روش شبکه‌بندی و همچنین انتخاب مدل گسسته‌سازی مناسب وابستگی زیادی دارد در شبکه‌بندی هندسه دقت کافی بکار رفته است.

جدول (۲): جزئیات شبکه‌بندی برای استقلال نتایج از شبکه

| Mesh  | Grid number | Mass flow rate | Diff, % | $\Delta T$ | Diff, % | $Y^+$ value |
|-------|-------------|----------------|---------|------------|---------|-------------|
| Mesh1 | 153987      | 0.050367       | 16.05   | 20.69      | 31.03   | 2.09        |
| Mesh2 | 256987      | 0.052668       | 12.22   | 24.33      | 18.9    | 1.61        |
| Mesh3 | 332091      | 0.059302       | 1.16    | 27.78      | 7.4     | 1.1         |

پایینی دودکش تا ۳ برابر عرض کانال تأثیر قابل توجه بر نرخ جریان پیش‌بینی شده ندارد.



شکل (۳): دامنه محاسباتی و هندسه مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل دینامیک سیالات محاسباتی

در بررسی‌های اولیه شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای اعتبارسنجی، مشاهده شد که برای دستیابی به دبی جرمی جریان هوا قابل مقایسه با نرخ جریان اندازه‌گیری شده (مطالعه تجربی)، شدت آشفتگی جریان در ناحیه ورودی مدل شبیه‌سازی شده، باید حدود ۲۰٪ یا بالاتر باشد که این مقدار از شدت آشفتگی به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر مورد استفاده در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای دودکش خورشیدی است. با این حال این میزان از آشفتگی ایجاد شده در کانال هوا آزمایش بورک و حبیب [30] ناشی از دو دلیل می‌تواند باشد، اولاً عدد رابلی در آزمایش‌های آن‌ها بالاتر از  $10^{11}$  است ثانیاً سنسورهای توزیع شده در داخل کانال هوا ممکن است باعث آشفتگی شده و شدت آشفتگی جریان را افزایش دهند؛ لذا در مدل دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه شده برای پیش‌بینی نرخ جریان در آزمایش بورک و حبیب شدت

هوای عبوری از دودکش در ناحیه خروجی،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه هوا در فشار ثابت،  $T_{out,mw}$  دمای متوسط هوای خروجی از دودکش که بر اساس میانگین‌گیری وزنی با دبی جرمی بر روی سطح خروجی محاسبه شده است،  $T_{in,mw}$  دمای متوسط هوای ورودی به دودکش که بر اساس میانگین‌گیری وزنی با دبی جرمی بر روی سطح ورودی محاسبه شده است،  $q''$  شار حرارتی یکنواخت اعمال شده بر سطح جاذب دودکش خورشیدی،  $A_{abs}$  مساحت سطح جاذب حرارتی دودکش خورشیدی. لازم به ذکر است که حتی در شرایط آدیاباتیک بودن دیواره شیشه‌ای، راندمان حرارتی دودکش خورشیدی لزوماً برابر با یک نخواهد بود. دلیل این موضوع آن است که بخشی از انرژی ورودی از سطح جاذب صرف غلبه بر افت‌های لزجی، افزایش انرژی جنبشی جریان هوا و

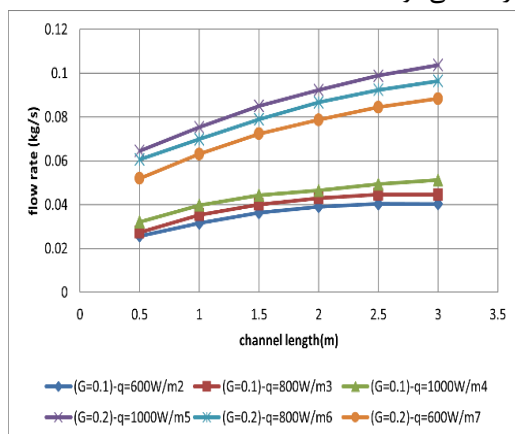
باتوجه به اینکه در یک حل عددی نتایج خروجی به شدت وابسته به شبکه‌بندی و شرایط مرزی مسئله است؛ لذا برای اطمینان از اینکه شبکه‌بندی ایجاد شده دارای دقت کافی است باید استقلال نتایج از شبکه‌بندی مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعه حاضر برای اطمینان از این موضوع هندسه مورد بررسی را در ۳ حالت مختلف شبکه‌بندی کرده و نتایج خروجی را مورد بررسی قرار داده‌ایم. جزئیات شبکه‌بندی و نتایج خروجی در جدول (۲) آورده شده است. دامنه محاسباتی به صورت شبکه غیریکنواخت دوبعدی با المان‌های چهارضلعی تولید شده و در مجاورت دیواره‌ها از لایه‌های استفاده شده است تا تغییرات گرادیان سرعت و دما به خوبی ثبت شود. نسبت رشد سلول‌ها در راستای عمود بر دیواره کوچک در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که شبکه‌بندی نوع سوم از نقطه نظر تعداد المان‌ها به دلیل داشتن دقت قابل قبول مناسب است. مقادیر  $y^+$  در تمامی حالات کمتر از ۲ باقی بماند. نتایج نشان می‌دهد که برای مقادیر  $y^+ < 2$ ، دبی جرمی و اختلاف دما مستقل از اندازه شبکه هستند.

### ۵- اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل دینامیک سیالات محاسباتی، نتایج شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده نگوین [29] مورد ارزیابی قرار گرفته است. نگوین نیز در مقاله خود نتایج شبیه‌سازی عددی خود را با نتایج تجربی بورک [30] مورد ارزیابی قرار داده است که در آن یک دودکش خورشیدی با ارتفاع ۱۰۲٫۵ سانتی‌متر و عرض ۹۲٫۵ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفتن است (شکل (۳)). با این تفاوت که مرز پایینی دامنه در ورودی، پایین‌تر از کانال هوا قرار دارد؛ زیرا بر اساس مطالعات گان [26]، [27]، [28] طول نمودن ورودی

سطح جاذب (۶۰۰ وات بر مترمربع ۸۰۰ وات بر مترمربع و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع) در شکل (۵) ترسیم شده است.

در شکل (۵) در فاصله شکاف هوایی ثابت در کانال، نرخ جریان با افزایش طول و شار حرارتی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود در یک طول معین، با افزایش فاصله شکاف هوایی کانال از ۰٫۱ متر به ۰٫۲ متر تقریباً نرخ جریان دوبرابر می‌شود. این روند مشابه روند مشاهده شده در آزمایش‌های قبلی و مطالعات عددی و تحلیلی است. همچنین نشان می‌دهد که برای یک دودکش افقی، افزایش فاصله شکاف هوایی دودکش به صورت پیوسته باعث افزایش دبی جریان هوا می‌شود، از طرفی با بررسی خطوط جریان تمام حالت‌های فوق، مشاهده می‌شود که در هیچ‌کدام از این حالت‌ها جریان بازگشتی ایجاد نمی‌شود. حال به بررسی روند تغییرات بازده کانال با تغییر دو عامل طول و فاصله شکاف هوایی پرداخته می‌شود. با توجه به شکل (۶)، با افزایش طول، بازده حرارتی همیشه به یک نقطه اکسترمم می‌رسد و مشاهده می‌شود در طول‌های برابر، با افزایش فاصله شکاف هوایی دودکش بازده کل کاهش می‌یابد؛ ولی در این حالت نرخ افزایش نسبت به حالتی که  $G=0.2$  بیشتر است. در خاتمه با تحلیل نمودارها مشاهده می‌شود در هیچ حالتی بازده دودکش بیشتر از ۹۰ درصد نمی‌شود.



شکل (۵): تغییرات نرخ دبی جرمی جریان هوا دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی (بررسی اثرات ناشی از تغییر طول و فاصله شکاف هوایی)

### اثرات ارتفاع ورودی و خروجی دودکش بر نرخ دبی جرمی جریان هوا و بازده دودکش خورشیدی

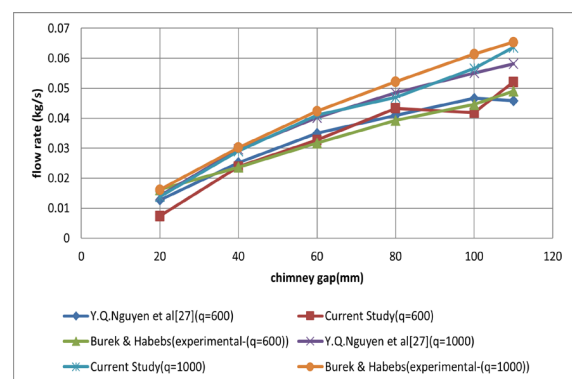
تغییر ارتفاع ورودی و خروجی دودکش خورشیدی مطابق شکل (۴) سطح انتقال حرارت را تغییر نمی‌دهد؛ بلکه اختلاف ارتفاع را تغییر می‌دهد که این امر بر غلبه نیروی شناوری بر نیروهای لزجتی و سایر نیروها اثر می‌گذارد. میزان دبی جرمی هوای عبوری از دودکش و بازده حرارتی ممکن است براین اساس تغییر کنند. در مطالعه حاضر دودکش با فاصله شکاف هوایی ۰٫۱ متر در ارتفاع‌های مختلف کانال‌های ورودی و خروجی مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات بیشتر ابعاد هندسه‌های مورد مطالعه در جدول (۴) فهرست شده‌اند.

آشفستگی ۲۰٪ و اندازه‌های مش که  $y^+ < 2.0$  را نتیجه می‌دهند به کار گرفته شده‌اند.

اما در انتخاب شدت آشفستگی جریان هوا در ورودی کانال باید توجه شود که در مدل شبیه‌سازی شده، یک کانال هوای خالی موجود است که در آن آشفستگی در کانال باید از دینامیک جریان توسعه یابد درحالی‌که در آزمایش، می‌تواند توسط سنسورها و یا سایر عامل‌ها افزایش یابد؛ بنابراین، مقدار کم‌تر شدت آشفستگی باید در شبیه‌سازی استفاده شود.

در مطالعه حاضر اندازه‌های مختلف مش برای شار حرارتی ۱۰۰۰ وات مورد آزمایش قرار گرفته است و شدت آشفستگی برای همه سایزهای مش‌بندی ۱۰٪ در ورودی کانال و ۱/۰٪ در مرز دیواره‌ها تنظیم شده است. از نتایج مطالعه نگورین [29] می‌توان نتیجه گرفت که هم نرخ جریان و هم افزایش دما برای  $y^+$  کم‌تر از ۲/۰ مستقل از اندازه مش هستند. این مقدار با نتایج زامورا و کایزر [31] همخوانی دارد که گزارش دادند که مدل دینامیک سیالات محاسباتی آن‌ها به استقلال شبکه‌ای برای  $y^+$  کم‌تر از ۱٫۰ دست‌یافته است.

دو معیار برای ارزیابی دقت و صحت مدل شبیه‌سازی شده دبی جرمی جریان هوای ایجاد شده درون دودکش و اختلاف دمای هوا بین ورودی و خروجی دودکش انتخاب شده و نتایج و نمودارهای هر کدام به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۴): نمودار تغییرات دبی جرمی جریان هوا بر حسب تغییرات فاصله شکاف هوایی در دودکش خورشیدی - هندسه شماره ۱

### اثرات طول و بازده دودکش شکاف هوایی بر نرخ دبی جرمی جریان هوا و بازده دودکش خورشیدی

برای بررسی اثرات طول و فاصله شکاف هوایی بر نرخ دبی جرمی جریان هوا و بازده دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی دودکش‌هایی با فاصله شکاف هوایی به ترتیب ۰٫۱ متر و ۰٫۲ متر در طول‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. جزئیات بیشتر در رابطه با ابعاد در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

نرخ دبی جرمی جریان برای دودکش‌هایی با فاصله شکاف هوایی و طول مختلف در سه مقدار شار حرارتی اعمال شده بر روی

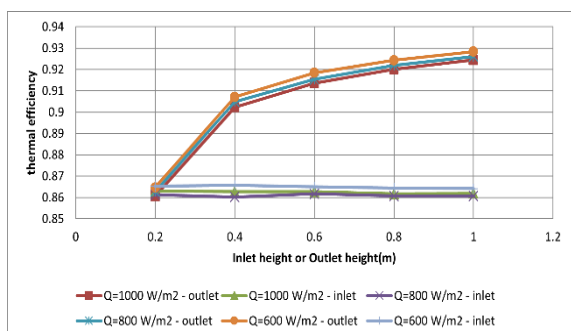
جدول (۳): جزئیات هندسه‌های مختلف دودکش‌های خورشیدی برای بررسی اثرات ناشی از طول و فاصله شکاف هوایی دودکش

| شماره هندسه | $D_{out}(m)$ | $D_{in}(m)$ | $L(m)$ | $G(m)$ | $H_{out}(m)$ | $H_{in}(m)$ |
|-------------|--------------|-------------|--------|--------|--------------|-------------|
| 1           | 0.1          | 0.1         | 1.0    | 0.1    | 0.2          | 0.2-1.0     |
| 2           | 0.1          | 0.1         | 1.0    | 0.1    | 0.2-1.0      | 0.2         |

جدول (۴): جزئیات هندسه‌های مختلف دودکش‌های خورشیدی برای بررسی اثرات ناشی از ارتفاع ورودی و خروجی دودکش

| شماره هندسه | $D_{out}(m)$ | $D_{in}(m)$ | $L(m)$ | $G(m)$ | $H_{out}(m)$ | $H_{in}(m)$ |
|-------------|--------------|-------------|--------|--------|--------------|-------------|
| 1           | 0.1          | 0.1         | 1.0    | 0.1    | 0.2          | 0.2-1.0     |
| 2           | 0.1          | 0.1         | 1.0    | 0.1    | 0.2-1.0      | 0.2         |

شکل (۷) دبی جرمی جریان هوای ایجاد شده را نشان می‌دهد و شکل (۸) بازده حرارتی حاصل را در سه مقدار مختلف شار حرارتی اعمال شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع خروجی، دبی جرمی جریان هوای ایجاد شده در دودکش افزایش می‌یابد. این روند مشابه روند شکل (۵) است (زمانی که طول افزایش می‌یابد) البته چنین نتیجه‌ای را نیز می‌توان انتظار داشت؛ زیرا هم طول و هم ارتفاع خروجی به اثر شناوری در کانال هوا کمک می‌کنند. باین‌حال، تغییر ارتفاع ورودی، اثر ناچیزی بر تغییر دبی جرمی هوای عبوری از دودکش دارد.



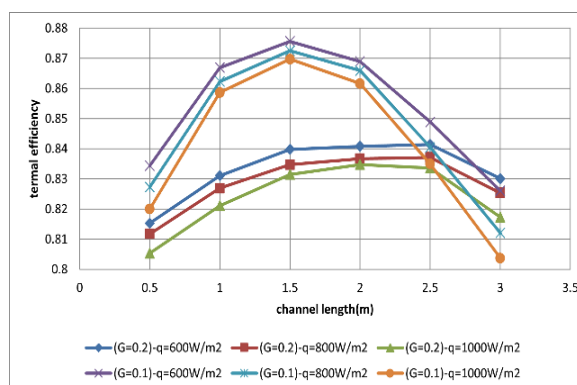
شکل (۸): نمودار تغییرات بازده دودکش خورشیدی با تغییر ارتفاع ورودی و خروجی دودکش

اثرات عرض ناحیه ورودی و خروجی دودکش بر نرخ دبی

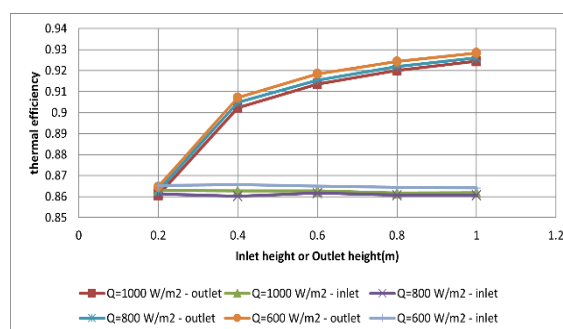
جرمی جریان هوا و بازده دودکش خورشیدی

اگرچه افزایش فاصله شکاف هوایی در دودکش‌های خورشیدی با سطح جاذب عمودی یا مایل، دبی جرمی را افزایش می‌دهد، اما فاصله شکاف هوایی بسیار بزرگ منجر به ایجاد جریان بازگشتی در خروجی کانال هوا می‌شود. در ناحیه جریان جدا شده، ناحیه مؤثر جریان کاهش می‌یابد که این امر افزایش بیشتر دبی جرمی عبوری از دودکش را سرکوب می‌کند.

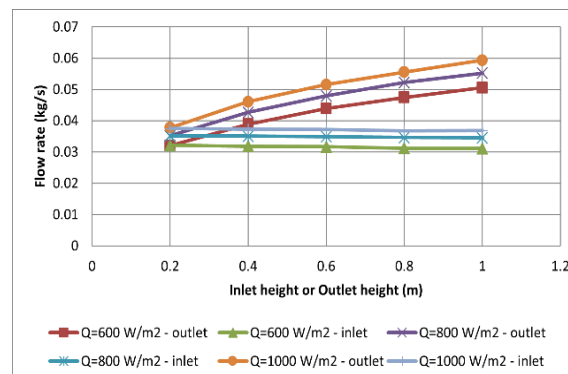
در مطالعه حاضر به بررسی دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی با ابعاد ( $H_{in}=H_{out}=0.5\text{ m}$ ,  $L=1.0\text{ m}$ ) در عرض‌های خروجی مختلف پرداخته شده است. برای بررسی تأثیر عرض ناحیه خروجی، فاصله شکاف هوایی و عرض ورودی ثابت و برابر با ۰.۱



شکل (۶): نمودار تغییرات بازده دودکش خورشیدی با تغییر فاصله شکاف هوایی و طول دودکش

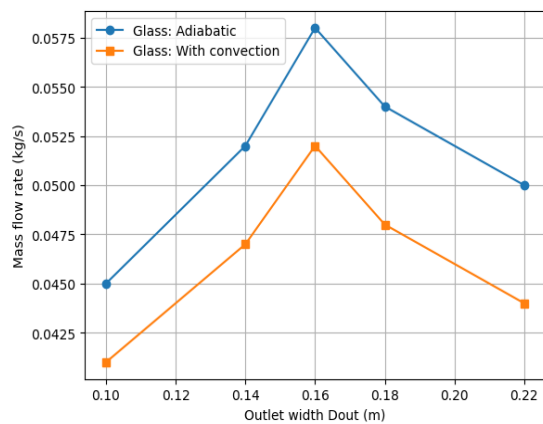


شکل (۸): نمودار تغییرات بازده دودکش خورشیدی با تغییر ارتفاع ورودی و خروجی دودکش

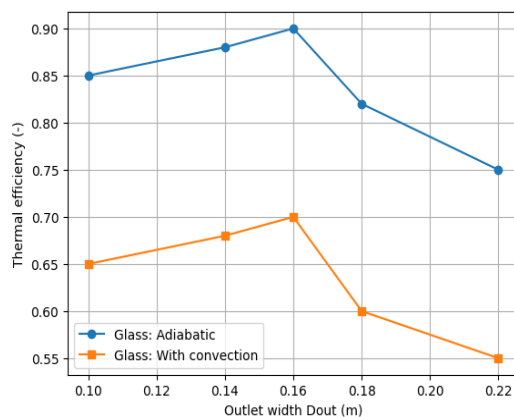


شکل (۷): تغییرات نرخ دبی جرمی جریان هوا دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی (بررسی اثرات ناشی از تغییر ارتفاع ورودی و خروجی دودکش)

مطلق راندمان می‌شود، پایین‌وجود، نقطه افت شدید راندمان که متناظر با ایجاد جریان بازگشتی در خروجی است، در هر دو مدل در محدوده یکسانی از عرض خروجی رخ می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه تغییرات دبی جرمی جریان هوا بر حسب عرض خروجی دودکش برای دو مدل شیشه آدیاباتیک و دارای اتلاف حرارتی

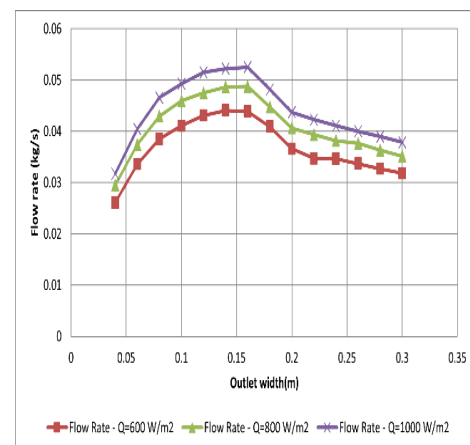


شکل (۱۱): اثر مدل‌سازی شیشه (آدیاباتیک و دارای اتلاف حرارتی) بر تغییرات راندمان حرارتی دودکش خورشیدی

نتایج شکل (۱۱) و (۱۲) نشان داد که در نظر گرفتن اتلاف حرارتی شیشه، اگرچه مقادیر مطلق دما و راندمان را کاهش می‌دهد، اما تأثیر معناداری بر مکانیزم جریان، روند تغییرات دبی جرمی و نسبت‌های هندسی بحرانی ندارد. بررسی خطوط جریان و توزیع دما نشان می‌دهد که جریان بازگشتی حتی در عرض‌های خروجی کمتر از ۰٫۱۶ متر نیز ظاهر شده است با این تفاوت که در این بازه ( $D_{out}=0.16-0.17m$ ) ناحیه جدا شده جریان کاملاً بزرگ شده و تأثیر واضحی بر دبی جرمی جریان عبوری از دودکش دارد. باید توجه داشت که جریان بازگشتی در دودکش‌های خورشیدی عمودی تنها مانع از افزایش نرخ دبی جریان هوای عبوری و در دودکش‌های افقی به‌طور کلی باعث کاهش دبی جرمی جریان هوای عبوری از دودکش می‌شود. از طرفی بازده حرارتی محاسبه شده در عرض‌های خروجی مختلف که در شکل ۹ نشان داده شده است نیز روند مشابهی را برای نرخ جریان هوای عبوری از دودکش نشان می‌دهد، به صورتی که کاهش بازده از  $D_{out}=0.16$  متر بر

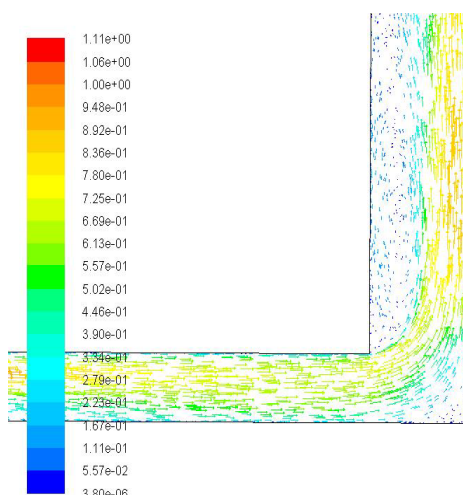
متر قرار داده شده است. شکل ۹ نرخ دبی جرمی و شکل ۱۰ بازده حرارتی را نشان می‌دهد به‌طوری‌که عرض ناحیه خروجی دودکش از ۰٫۰۵ متر تا ۳/۰ متر تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که دبی جرمی جریان هوای عبوری از دودکش تا عرض خروجی ۰٫۱۷ و ۰٫۱۶ متر تقریباً به‌صورت پیوسته افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر عرض خروجی در خارج از این بازه سرعت جریان در خروجی دودکش به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و تقریباً می‌توان گفت نرخ کاهش دبی جرمی برای  $D_{out} > 0.2$  ثابت است. نتایج برای سه مقدار مختلف شار حرارتی اعمال‌شده روند تغییرات مشابهی دارند. قابل‌ذکر است که مقادیر عرض خروجی که نرخ جریان را به حداکثر می‌رساند در شارهای حرارتی مختلف اعمال شده بسیار نزدیک هستند.

به‌منظور بررسی تأثیر فرض آدیاباتیک بودن شیشه بر نتایج شبیه‌سازی، یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل اولیه و مدل اصلاح‌شده که در آن انتقال حرارت جابه‌جایی بین شیشه و محیط بیرون لحاظ شده است، انجام شد. نتایج این مقایسه در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در نظر گرفتن اتلاف حرارتی شیشه موجب کاهش مقادیر مطلق دبی جرمی جریان هوا می‌گردد که امری فیزیکی و قابل‌انتظار است. با این حال، روند تغییرات دبی جرمی و همچنین موقعیت نسبت هندسی بحرانی که در آن جریان بازگشتی در خروجی دودکش آغاز می‌شود، بدون تغییر اساسی باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که پدیده جریان بازگشتی عمدتاً ناشی از اثرات هندسی و ساختار میدان جریان بوده و وابستگی قابل‌توجهی به فرض آدیاباتیک بودن شیشه ندارد.



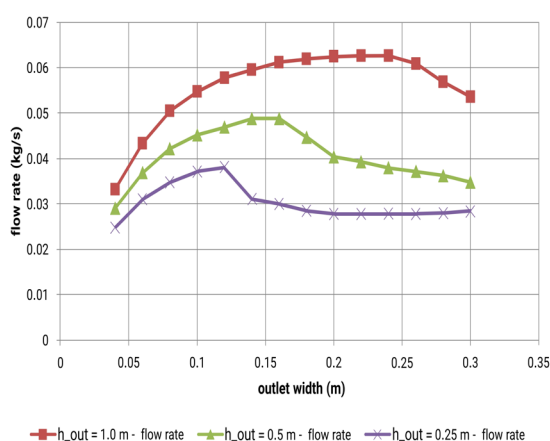
شکل (۹): تغییرات نرخ دبی جرمی جریان هوا دودکش خورشیدی با سطح جاذب افقی (بررسی اثرات ناشی از تغییر عرض ناحیه خروجی دودکش)

به‌منظور تکمیل این بررسی، تغییرات راندمان حرارتی نیز برای دو مدل شیشه مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این تحلیل، دمای خروجی بر اساس میانگین‌گیری جرمی محاسبه شده است. نتایج حاکی از آن است که در نظر گرفتن اتلاف حرارتی شیشه منجر به کاهش مقادیر



شکل (۱۳): بردارهای سرعت جریان سیال در خورشیدی با سطح جاذب

افقی  $H_{in}=H_{out}=0.5\text{ m}$  -  $D_{in}=0.1\text{ m}$  ,  $D_{out}=0.16\text{ m}$  ,  $G=0.1\text{ m}$



شکل (۱۴): تغییرات نرخ دبی جرمی جریان هوا در دودکش‌های

خورشیدی با سطح جاذب افقی (بررسی اثرات ناشی از عرض‌های خروجی

متفاوت در سه ارتفاع خروجی ثابت  $(L=1.0\text{ m}$  ,  $H_{in}=0.5\text{ m}$  ,

$G=D_{in}=0.1\text{ m}$ )

با تحلیل شکل (۱۴) و (۱۵) روند مشابهی از دبی جریان هوا و

بازده حرارتی برای هر سه ارتفاع خروجی مشاهده می‌شود. عرض

خروجی بحرانی ( $D_{out,critical}$ ) که در آن دبی جرمی جریان و بازده

شروع به افت می‌کند به طور قابل توجهی با ارتفاع خروجی افزایش می‌یابد. این در حالی است که نسبت  $D_{out,critical}/G$  برای سه حالت

ارتفاع خروجی ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۱٫۰ متر به ترتیب برابر با ۰٫۳۴، ۰٫۵ و ۰٫۲۶

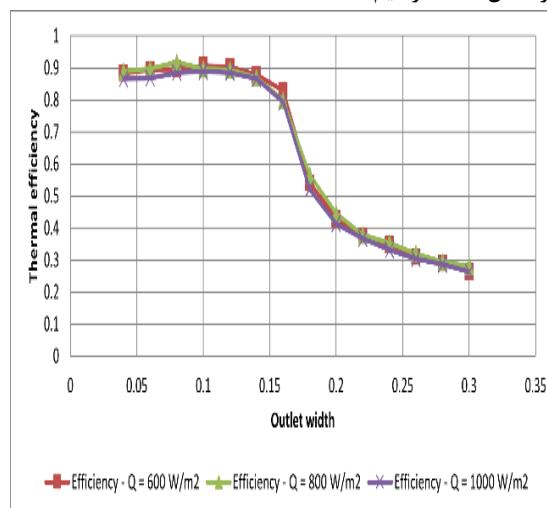
و ۰٫۲۶ است، درحالی‌که اعداد رایلی به ترتیب  $5 \times 10^{12}$ ،  $4 \times 10^{10}$  و  $10^{11}$  هستند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نسبت

$D_{out}/G$  بحرانی با ارتفاع خروجی رابطه عکس دارد.

اثر ایجاد جریان بازگشتی به صورت یک پدیده غالب آغاز شده و تا  $D_{out} = 0.17$  متر ادامه پیدا می‌کند؛ زیرا در این بازه سرعت جریان شروع به کاهش می‌کند و جریان بازگشتی در خروجی به طور قابل توجهی بازده را کاهش می‌دهد. کاهش راندمان در حالت آدیاباتیک ناشی از افت‌های هیدرودینامیکی، افزایش انرژی جنبشی جریان و تشکیل جریان بازگشتی در خروجی است. مشاهده می‌شود که حتی در حالت آدیاباتیک، راندمان حرارتی کمتر از یک باقی می‌ماند که این موضوع بیانگر نقش غالب اثرات هیدرودینامیکی و ساختار میدان جریان در محدود کردن تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مفید جریان هوا است.

در رابطه با تأثیر عرض ورودی دودکش بر میزان دبی جرمی جریان هوای ایجاد شده، در عرض‌های ورودی تا دوبرابر فاصله شکاف هوایی دودکش (فاصله شکاف هوایی  $G$  ثابت) مشاهده می‌شود که دبی جرمی جریان هوا افزایش یافته و سپس به مقدار ثابتی می‌رسد. بازده نیز روند مشابهی را نشان می‌دهد و تغییر آن در حدود ۲٫۵٪ است که برای اهداف عملی قابل چشم‌پوشی است؛ لذا از بررسی عرض‌های ورودی مختلف جهت مطالعه تأثیر آن بر میزان دبی جرمی جریان هوا اجتناب شده است.

داده‌های شکل (۱۲) در حالتی که ارتفاع خروجی ثابت باشد استخراج شده‌اند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، ایجاد جریان بازگشتی در خروجی به نسبت فاصله شکاف هوایی کانال بر ارتفاع خروجی ( $G/h_{out}$ ) بستگی دارد. (صرفاً به فاصله شکاف هوایی  $G$  وابسته نیست) به جهت مطالعه دقیق‌تر این موضوع، دودکش‌هایی با عرض خروجی متفاوت در سه ارتفاع خروجی و شار حرارتی ۸۰۰ وات بر مترمربع مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل در شکل (۱۳) ترسیم شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار تغییرات بازده دودکش خورشیدی با تغییر عرض ناحیه خروجی دودکش

افزایش عدد رایلی در محدوده  $10^{10}$  تا  $10^{12}$  کاهش می‌یابد.

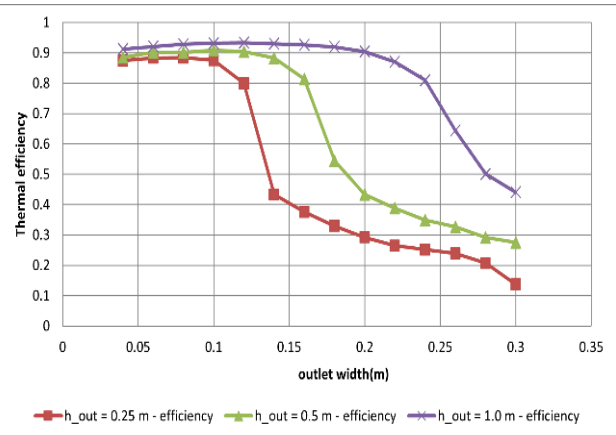
۷- با اعمال تغییرات در عوامل مختلف دودکش خورشیدی بازده حرارتی تنها در کمتر از ۷٪ در محدوده تست شده خود تغییر می‌کنند، به جز برای عرض خروجی، عرض خروجی به طور قابل توجهی بازده حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ زیرا زمانی که عرض خروجی بیشتر از مقدار بحرانی افزایش می‌یابد جریان بازگشتی در خروجی هم نرخ جریان و هم افزایش دما در دودکش را کاهش می‌دهد و به تبعیت از آنها بازده دودکش نیز کاهش می‌یابد که این تغییر از حدود ۹۰٪ به حدود ۳۰٪ است.

#### ۷- فهرست علائم

| علائم    | واحد               | توضیح                                                                                                                                                                             |
|----------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_p$    | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ | ظرفیت گرمایی ویژه                                                                                                                                                                 |
| $D$      | m                  | قطر دودکش                                                                                                                                                                         |
| $h$      | $W.m^{-2}.K^{-1}$  | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی                                                                                                                                                       |
| $L$      | m                  | طول دودکش                                                                                                                                                                         |
| $k$      | $W.m^{-1}.K^{-1}$  | رسانش حرارتی                                                                                                                                                                      |
| $q$      | $W.m^{-2}$         | شار حرارتی                                                                                                                                                                        |
| $T$      | K                  | دما                                                                                                                                                                               |
| $U_{in}$ | $m.s^{-1}$         | سرعت متوسط ورودی                                                                                                                                                                  |
| $Pr$     | -                  | عدد پراتل                                                                                                                                                                         |
| $Y^+$    | -                  | یک عدد بی بعد است که فاصله بین مرکز المان تا دیواره را بدون بعد می‌کند و این عامل به‌عنوان معیاری برای ارزیابی تناسب اندازه (ارتفاع) المان شبکه روی مرزهای دیواره استفاده می‌شود. |

#### ۸- مراجع:

- [1] Keyhanpour M, Ghasemi M. Three-dimensional simulation of the effect of geometry and temperature distribution on the performance of a solid oxide fuel cell. J. Fluid Mech. Aerodyn. 1400;10(2):169–184. (In Persian).  
dor:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1400.10.2.9.6
- [2] Goudarzi A, Ghanbarnia Souteh M, Doostdar MM, Zamanpour Zahraei MS. Performance evaluation of a spark-ignition rotary Wankel engine at altitude under the effect of a turbocharging system. J. Fluid Mech. Aerodyn. 1400;10(1):129–141. (In Persian).  
dor:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1400.10.1.9.4
- [3] Rahaei O, Abi Sh, Seyed Shams Taleghani SA. Uniformization of the ventilation process in indoor exhibition halls of the Shush archaeological museum with limited interventions. J. Fluid Mech. Aerodyn. 1401;11(1):41–55. (In Persian).  
dor:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.3.5



شکل (۱۵): تغییرات بازده دودکش‌های خورشیدی با سطح جاذب

افقی در عرض‌های خروجی متفاوت با سه ارتفاع خروجی (  $L=1.0\text{ m}$  ,  $H_{in}=0.5\text{ m}$  ,  $G=D_{in}=0.1\text{ m}$  )

#### ۶- نتیجه‌گیری

بررسی عملکرد دودکش خورشیدی نشان داد که نرخ دبی جرمی جریان هوا و بازده حرارتی آن به عوامل مختلفی از جمله شار حرارتی سطح جاذب، طول دودکش، فاصله شکاف هوایی، و ابعاد نواحی ورودی و خروجی وابسته است. نتایج حاصل حاکی از آن است که:

۱- با افزایش طول سطح جاذب، فاصله شکاف هوایی و شار حرارتی، دبی جریان هوا افزایش می‌یابد؛ رفتاری که مشابه با عملکرد دودکش‌های خورشیدی عمودی یا مایل گزارش شده است.

۲- هنگامی که طول و فاصله شکاف هوایی در دودکش خورشیدی ثابت هستند، افزایش ارتفاع ناحیه خروجی دودکش نرخ جریان را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد درحالی‌که افزایش ارتفاع ورودی تأثیر بسیار کمی بر نرخ جریان عبوری دارد.

۳- زمانی که عرض ورودی افزایش می‌یابد، نرخ جریان افزایش می‌یابد و به تدریج تا زمانی که عرض ورودی به مقدار حدود دوبرابر فاصله شکاف هوایی می‌رسد، دبی جریان عبوری به مقدار ثابتی نزدیک می‌شود.

۴- با افزایش تدریجی عرض خروجی به مقدار بیشتر از دوبرابر فاصله شکاف هوایی، نرخ دبی جرمی جریان تا مقدار بحرانی (که حداکثر دبی جریان هوای ایجاد شده است) افزایش می‌یابد. فراتر از این مقدار بحرانی، جریان بازگشتی به‌عنوان یک پدیده غالب در خروجی دودکش ایجاد می‌شود که نرخ جریان را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

۵- نتایج نشان داد که حتی در شرایط آدیاباتیک، به دلیل وجود افت‌های لزجتی و پدیده جریان بازگشتی در خروجی دودکش، دستیابی به راندمان حرارتی واحد امکان‌پذیر نیست و هندسه خروجی نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل این افت عملکرد دارد.

۶- نسبت عرض خروجی بحرانی به فاصله شکاف هوایی با

- [15] Shi L, Zhang G, Yang W, Huang D, Cheng X, Setunge S. Determining the influencing factors on the performance of solar chimney in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018;88:223–238. doi:10.1016/j.rser.2018.02.033.
- [16] Zavala-Guillén I, Xamán J, Hernández-Pérez I, Hernández-López I, Jiménez-Xamán C, Moreno-Bernal P, Saucedo D. Ventilation potential of an absorber-partitioned air channel solar chimney for diurnal use under Mexican climate conditions. *Appl. Therm. Eng.* 2019;149:807–821. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.074.
- [17] Khedari J, Boonsri B, Hirunlabh J. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy Build.* 2000;32(1):89–93. doi:10.1016/S0378-7788(99)00042-0.
- [18] • Chungloo S, Limmeechokchai B. Utilization of cool ceiling with roof solar chimney in Thailand: The experimental and numerical analysis. *Renew. Energy.* 2009;34(3):623–633. doi:10.1016/j.renene.2008.05.026.
- [19] Miyazaki T, Akisawa A, Kashiwagi T. The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate. *Renew. Energy.* 2006;31(7):987–1010. doi:10.1016/j.renene.2005.05.003.
- [20] Charvat P, Jicha M, Stetina J. Solar chimneys for ventilation and passive cooling. In: *World Renewable Energy Congress*; 2004; Denver, USA.
- [21] Punyasompun S, Hirunlabh J, Khedari J, Zeghamati B. Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings. *Renew. Energy.* 2009;34(12):2545–2561. doi:10.1016/j.renene.2009.03.032.
- [22] Chen ZD, Bandopadhyay P, Halldorsson J, Byrjalsen C, Heiselberg P, Li Y. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Build. Environ.* 2003;38(7):893–906. doi:10.1016/S0360-1323(03)00057-X.
- [23] Nguyen YQ, Wells JC. A numerical study on induced flowrate and thermal efficiency of a solar chimney with horizontal absorber surface for ventilation of buildings. *J. Build. Eng.* 2020;28:101050. doi:10.1016/j.jobe.2019.101050.
- [24] Fakhari M, Heydari Sh. Optimization of solar chimney and investigation of its effect on building ventilation. *Honarhā-ye Zibā: Memāri va Shahrsāzi (Fine Arts – Architecture and Urban Planning)*. 1392;18(2):83–88. (In Persian). dor:20.1001.1.22286020.1392.18.2.7.6.
- [25] Saghafi MJ, Fakhari M. Investigation of the effect of solar chimney on building ventilation in different
- [4] Zamora B. A review on solar chimneys: From natural convection fundamentals to thermohydraulic best-performance proposals. *Processes.* 2023;11(2):386. doi:10.3390/pr11020386.
- [5] Yousefzadeh Sh, Ghanbari Gh, Doostdar MM. Numerical study of the effect of magnetic field on exergy efficiency in a parabolic solar collector equipped with combined turbulators filled with magnetic hybrid nanofluid. *J. Fluid Mech. Aerodyn.* 1403;13(1):31–42. (In Persian). dor:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.1.13.9
- [6] Ye C, Zhang Y, Lv Q, Lou S, Luo X, Chen Z, Zhang G. Enhanced ventilation and energy efficiency of an optimized double-channel solar chimney. *Buildings.* 2025;15(8):1380. doi:10.3390/buildings15081380.
- [7] Khoshnavid A, Moeidi MK. Numerical simulation of airflow effects on dust particle displacement over the surface of a parabolic-trough solar collector array for designing an automatic cleaning system. *J. Fluid Mech. Aerodyn.* 1401;11(1):97–113. (In Persian). dor:https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.7.9
- [8] Vázquez-Ruiz A, Navarro JMA, Hinojosa JF, Xamán JP. Effect of the solar chimney position on heat transfer in a room. *Int. J. Mech. Sci.* 2021;209:106700. doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106700.
- [9] Yue S, Ge Z, Xu J, Xie J, Xie Z, Zhang S, Li J. Analysis of the ventilation performance of a solar chimney coupled to an outdoor wind and indoor heat source. *Appl. Sci.* 2023;13(4):2585. doi:10.3390/app13042585.
- [10] Bansal NK, Mathur R, Bhandari MS. Solar chimney for enhanced stack ventilation. *Build. Environ.* 1993;28(3):373–377. doi:10.1016/0360-1323(93)90042-2.
- [11] Chen ZD, Bandopadhyay P, Halldorsson J, Byrjalsen C, Heiselberg P, Li Y. An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Build. Environ.* 2003;38(7):893–906. doi:10.1016/S0360-1323(03)00057-X.
- [12] Ong KS, Chow CC. Performance of a solar chimney. *Sol. Energy.* 2003;74(1):1–17. doi:10.1016/S0038-092X(03)00114-2.
- [13] Bansal NK, Mathur J, Mathur S, Jain M. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Build. Environ.* 2005;40(10):1302–1308. doi:10.1016/j.buildenv.2004.10.011.
- [14] Adam J, Yamanaka T, Kotani H. Mathematical model and experimental study of airflow in solar chimneys. In: *Proc. 8th Int. Conf. Air Distribution in Rooms (ROOMVENT 2002)*; 2002. p. 621–624.

- climates of Iran. *Naqsh-e Jahan*. 1391;2(2):43–54. (In Persian). [doi:20.1001.1.23224991.1391.2.2.7.9](#).
- [26] Gan G. Prediction of turbulent buoyant flow using an RNG k- $\epsilon$  model. *Numer. Heat Transfer A: Appl.* 1998;33(2):169–189.
- [27] Gan G. Simulation of buoyancy-induced flow in open cavities for natural ventilation. *Energy Build.* 2006;38(5):410–420.
- [28] Gan G. Impact of computational domain on the prediction of buoyancy-driven ventilation cooling. *Build. Environ.* 2010;45(5):1173–1183.
- [29] Nguyen YQ, Wells JC. A numerical study on induced flowrate and thermal efficiency of a solar chimney with horizontal absorber surface for ventilation of buildings. *J. Build. Eng.* 2020;28:101050. [doi:10.1016/j.jobe.2019.101050](#).
- [30] Burek SAM, Habeb A. Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe walls. *Energy Build.* 2007;39(2):128–135.
- [31] Zamora B, Kaiser AS. Optimum wall-to-wall spacing in solar chimney-shaped channels in natural convection by numerical investigation. *Appl. Therm. Eng.* 2009;29(4):762–769.
- [32] Khanal R, Lei C. Flow reversal effects on buoyancy-induced air flow in a solar chimney. *Sol. Energy.* 2012;86(9):2783–2794.
- [33] Bassiouny R, Korah NSA. Effect of solar chimney inclination angle on space flow pattern and ventilation rate. *Energy Build.* 2009;41(2):190–196