



Comparative Investigation of Thermal Performance of Multi-Layered Canopies with Complex Geometries in Double-Skin Facades

ARTICLE INFO

Article Type

Analytic Study

Authors

Mostafa Hosseini Vajari¹
Hossein Moradi Nasab^{1*}
Morteza Behzadnasab²
Mahmoud
Nikkhah Shahmirzadi³
Majid Soltani⁴

How to cite this article

Falaha

URL: <http://>

ABSTRACT

Aims: This study aims to investigate the impact of shading devices and airflow velocity on the thermal (energy) performance and convective flow in a south-facing double-skin façade of a building located in Semnan, a hot and arid region in Iran. The research seeks to determine which type of shading device, including inclined and multi-layer shades, can most effectively reduce indoor temperature and enhance convective flow.

Methods: Numerical simulations were conducted using SolidWorks and COMSOL Multiphysics software for geometry modeling, fluid flow simulation, and heat transfer analysis, respectively. A two-dimensional double-skin façade with various shading configurations was considered, and turbulent natural ventilation flow within them was examined.

Findings: Simulation results demonstrated that the geometry and airflow velocity significantly influenced the velocity and turbulence of the airflow within the double-skin cavity. A geometry with a multi-layer (asymmetric) shading device exhibited an 18.5% temperature reduction at the same wind speed. The maximum temperature reduction occurred in a geometry with a multi-layer (asymmetric) shading device and an airflow velocity of 5 meters per second. In other words, the best thermal performance was observed in multi-layer shading devices.

Conclusion: This research indicated that the use of multi-layer (asymmetric) shading devices can effectively reduce indoor temperature and enhance convective flow. These findings suggest that the appropriate design of shading devices can be employed as a passive method to reduce energy consumption in buildings.

Keywords: Double-skin façade, Canopy, Convection flow, Turbulent flow, Thermal comfort

CITATION LINKS

1-Department of Architecture, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2-Color Department, Polymer Process Research Institute, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

3-Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

4-Faculty of Mechanical Engineering, khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Color Department, Polymer Process Research Institute, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Email:

moradinassab_h@yahoo.com

Article History

Received:

Accepted:

Published:

[1]- Röck M, Saade MR, Balouktsi M, Rasmussen FN, Birgisdottir H, Frischknecht R, Habert....[2]- Gonçalves M, Figueiredo A, Almeida RM, Vicente R. Dynamic façades in buildings....[3]- Halawa E, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Trombley J, Hassan N, Baig....[4]- Souayfane F, Biwole PH, Fardoun F. Thermal behavior of a translucent superinsulated....[5]- Zhang T, Yang H. Flow and heat transfer characteristics of natural convection in vertical air channels....[7]- Pelletier K, Wood C, Calautit J, Wu Y. The viability of double-skin façade systems....[8]- Op't Veld P. Introduction to EC RESHYVENT-EU cluster project on....[9]- Kariminia S, Rezaie M, Farokhi M, Shooshtarian S, Shamshirband S....[10]- Zanelli A, Mazzola C. Towards the Smart Filter. InLightweight Energy: Membran....[11]- Xamán J, Álvarez G, Lira L, Estrada C. Numerical study of heat transfer....[12]- Al Dakheel J, Tabet Aoul K. Building Applications, opportunities and challenges....[13]- Palmero-Marrero AI, Oliveira AC. Evaluation of a solar thermal....[14]- Javanroodi K, Mahdavejad M, Nik VM. Impacts of urban morpho....[15]- Preet S, Mathur J, Mathur S. Influence of geometric design parameters....[16]- Li Y, Darkwa J, Kokogiannakis G, Su W. Phase change material blind....[17]- Jankovic A, Goia F. Impact of double skin facade constructional features on....[18]- Hong X, Lin J, Yang X, Wang S, Shi F. Comparative analysis of the daylight....[19]- Wang M, Hou J, Hu Z, He W, Yu H. Optimisation of the double skin façade....[20]- Mohammed KI, Alibaba HZ. Solar Control and Shading Strategies for Double Skin....



بررسی تطبیقی عملکرد حرارتی سایبان های چندلایه با هندسه های پیچیده در نمای دوپوسته

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: تحقیق بنیادی

نویسندگان

مصطفی حسینی واجاری^۱
حسین مرادی نسب^{۲*}
مرتضی بهزادنسب^۳
محمود نیکخواه شه میرزادی^۴
مجید سلطانی^۵

۱ دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.
۲ دانشیار، گروه معماری، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران (نویسنده مسئول).
۳ استادیار، مهندسی پلیمر، گروه رنگ، پژوهشکده فرایند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران.
۴ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.
۵ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

نویسنده مسئول *

moradinasab_h@yahoo.com

اهداف: بررسی تأثیر سایبان و سرعت جریان هوا بر عملکرد حرارتی (انرژی) و جریان همرفت در نمای دوپوسته جنوبی یک ساختمان واقع در شهر سمنان در منطقه گرم خشک ایران. این تحقیق به بررسی کدام نوع سایبان، از جمله سایبان های مورب و چندلایه، می تواند به طور مؤثرتری دمای داخل ساختمان را کاهش داده و جریان همرفت را افزایش دهد.

روش ها: از شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزارهای سالیدورک و کامسول مولتی فیزیک به ترتیب برای مدل سازی هندسه، شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت استفاده شده است. یک نمای دوپوسته دو بعدی با سایبان های مختلف در نظر گرفته شده و جریان تهویه طبیعی آشفته در آنها بررسی شده است.

یافته ها: نتایج بدست آمده از شبیه سازی نشان داد که هندسه و سرعت جریان هوا بر سرعت و آشفته گی جریان هوا در داخل حفره پاکت دوپوسته تأثیرگذار است. هندسه ای با سایبان چند لایه (غیرمستقارن)، ۱۸/۵ درصد کاهش دما را در همین سرعت باد نشان داد. بیشترین کاهش دما در هندسه ای با سایبان چند لایه (غیرمستقارن) و سرعت جریان هوای ۵ متر بر ثانیه رخ داده است. به عبارتی، بهترین عملکرد حرارتی در سایبان های چند لایه مشاهده شده است.

نتیجه گیری: این پژوهش نشان داد که استفاده از سایبان های چندلایه (غیرمستقارن) می تواند به طور مؤثری دمای داخل ساختمان را کاهش داده و جریان همرفت را افزایش دهد. این یافته ها حاکی از آن است که طراحی مناسب سایبان ها می تواند به عنوان یک روش غیر فعال برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: نمای دوپوسته، سایبان، جریان همرفت، جریان آشفته، آسایش حرارتی

تاریخ مقاله

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

تاریخ انتشار:

ارجاع دهی

URL: <http://>

مقدمه

ساختمان‌ها از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی هستند و ساختمان‌های کارآمد برای مبارزه با تغییرات اقلیمی می‌توانند نقش عمده‌ای ایفا کنند [۱]. دوپوسته‌های ساختمان (نما) به شدت بر میزان شرایط آسایش، نور خورشید و مصرف سیستم‌های تهویه مطبوع مؤثر است [۲]. با افزایش نگرانی‌ها در مورد تغییرات آب و هوایی و نیاز به توسعه ساختمان‌های پایدار، نماهای دوپوسته به عنوان راه‌حلی نوآورانه برای کاهش مصرف انرژی توجه زیادی را در ساختمان‌های اداری، تجاری، مسکونی و دولتی به خود جلب کرده‌اند [۳]. از معضلات نماهای شیشه‌ای دوپوسته به خصوص در مناطقی با آب و هوای گرم ایجاد گرمای بیش از حد ناخواسته و افزایش مصرف انرژی سیستم‌های سرمایش برای تأمین شرایط آسایش است. تحقیقات گوناگونی در این خصوص انجام شده و یکی از بهینه‌ترین راهکارهای پیشنهادی در چنین مواردی، بکارگیری دستگاه‌های سایه‌بان بصورت لوورهای عمودی در نماهای شرقی و غربی و لوورهای افقی در نماهای رو به جنوب برای جلوگیری از نور خورشید و جلوگیری از گرمای بیش از حد است [۴].

نمای دوپوسته با تهویه طبیعی نوعی نما است که از دو لایه تشکیل شده و از دو نیروی اصلی یعنی اثر پشته و باد برای تهویه آن استفاده می‌کند. اثر دودکش به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که دمای هوای داخل یک حفره بیشتر از دمای هوای بیرون باشد و باعث افزایش آن شود. ارتباط بین توسعه اثر دودکش و افزایش سرعت جریان هوای تهویه در نمای دولایه وجود دارد [۵]. اثر باد زمانی اتفاق می‌افتد که باد در برابر دمپرها می‌وزد و در نتیجه اختلاف فشار در دهانه ایجاد می‌شود از این رو نرخ کل جریان هوا با اثر ترکیبی این دو اختلاف فشار تعیین می‌شود [۶]. برخلاف نماهای دولایه با تهویه مکانیکی، تهویه حفره طبیعی در درجه اول به عملکردهای قابل تغییری متکی است که تحت تأثیر عوامل محیطی مانند باد و تغییرات دما هستند. گنجاندن عملکردهای تغییر دهنده طراحی نما را بسیار پیچیده می‌کند و تخمین راندمان حرارتی یا تهویه این نوع نماها را دشوار می‌کند [۷].

سیستم تهویه مکانیکی امکان از اثربخشی بهتری برخوردار هستند، زیرا عملکرد آن تحت تأثیر شرایط آب و هوایی مانند

باد و اختلاف دما مانند تهویه طبیعی قرار نمی‌گیرد [۸]. نمای دوپوسته با تهویه طبیعی نیاز به مصرف انرژی الکتریسیته جهت راه‌اندازی فن را از بین می‌برد و محیطی آرام‌تر را ارائه می‌دهد. با این وجود، یک نمای دوپوسته با تهویه مکانیکی عملکرد بهتری را در طول تابستان نشان می‌دهد و دارای نرخ حذف حرارت از حفره به میزان ۲۵ درصد بیشتر از یک نمای دو لایه با تهویه طبیعی است [۹]. آزمایشات تجربی و مدل‌سازی عددی نشان داده در این نوع نماها داشتن یک لایه محافظ در برابر نور خورشید روی شیشه‌های خارجی بر جذب کمتر گرما مؤثر است و استفاده از یک سایه‌بان نیمه بسته منجر به تهویه بیشتر در حفره و کاهش بار سرمایش می‌شود و شرایط بدون باد به عنوان بدترین حالت برای بار خنک‌کننده در تابستان در نظر گرفته شد است [۱۰].

عملکرد حرارتی سیستم‌های نمای دوپوسته تحت تأثیر پارامترهای زیادی مانند پارامترهای هندسی، نوع تهویه، نوع سایبان و توصیف مسیر هوا قرار می‌گیرد. لذا ترکیب آزمایش و شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های نمای دوپوسته معتبرترین رویکرد در مطالعه نماهای دوپوسته است. مطالعات عددی و تجربی روی یک نمای دوپوسته با تهویه طبیعی در دانشگاه فنی مونیخ انجام شد. این سیستم دارای گردش هوای خارجی بود که هوا هم از بیرون تأمین و هم به بیرون تخلیه می‌شد [۱۱]. در این مطالعه به صورت عددی به بررسی جریان سیال و انتقال حرارت ناشی از همرفت طبیعی با استفاده از مدل‌های آرام و آشفته پرداخته شد.

با هدف بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی و آسایش ساکنان، مطالعه ابزارهای سایه‌بان برای ساختمان با نماهای دوپوسته از جنبه‌های مختلف استفاده از انرژی در ساختمان، از جمله گرمایش، سرمایش، و نفوذ نور طبیعی را در بر می‌گیرد. مطالعات با هدف طراحی راه‌حل‌های سایه‌زنی است که نه تنها گرمای داخل ساختمان‌ها را به حداقل می‌رساند، بلکه محیط داخلی دلپذیرتری را ایجاد می‌کند. این تمرکز بر آسایش حرارتی به‌ویژه در مناطقی که با درجه حرارت بالا مشخص می‌شوند [۱۲]. تأثیر انواع سایه‌زنی بر عملکرد انرژی ساختمان و کرکره‌های غلتکی خارجی، کرکره‌های غلتکی یکپارچه و فیلم‌های کنترل خورشیدی خارجی بر مصرف انرژی و سطوح نور طبیعی در شرایط آب و هوایی گوناگون مورد بررسی قرار

و ساز ساختمان‌های اداری و مسکونی در سمنان افزایش یافته است، که به ویژه برای اجرای اقدامات برای افزایش بهره‌وری انرژی آن‌ها اهمیت دارد. در این پژوهش، تأثیر سایبان و نوع آن بر الگوهای جریان هوا در حفره هوای یک نمای دوپوسته برای سه مورد زیر به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است: نمای دوپوسته هندسه ۱، نمای دوپوسته با سایبان‌های آلومینیومی مورب ۴۵ درجه، نمای دوپوسته با سایبان چندلایه با جهات مختلف.

مواد و روش‌ها

نمای دوپوسته: برای انجام شبیه‌سازی، براساس آزمایش تجربی انجام شده و داده‌های اندازه‌گیری از یک مرکز آزمایش در فضای باز واقع در دانشگاه فنی مونیخ، سایبان‌ها طراحی شدند [۳۱]. براساس مدل‌های تجربی و شبیه‌سازی شده در تحقیقات پیشین همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک ساختمان با نمای دوپوسته در سمت جنوب به عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است. نمای دوپوسته به عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۳ متر و عمق ۰/۸ متر که شامل یک جداره خارجی تک جداره به ضخامت ۰/۰۴ متر و شیشه داخلی دو جداره هر کدام ۰/۰۴ متر دارای یک دهانه ورودی هوا در قسمت پایین و دهانه خروجی در قسمت بالای حفره به ارتفاع ۰/۴ متر بود. یک اتاق یک طبقه با ابعاد ۵ متر عمق، ۰/۶ متر طول و ۳ متر ارتفاع از سمت شمال به نمای دوپوسته متصل است.

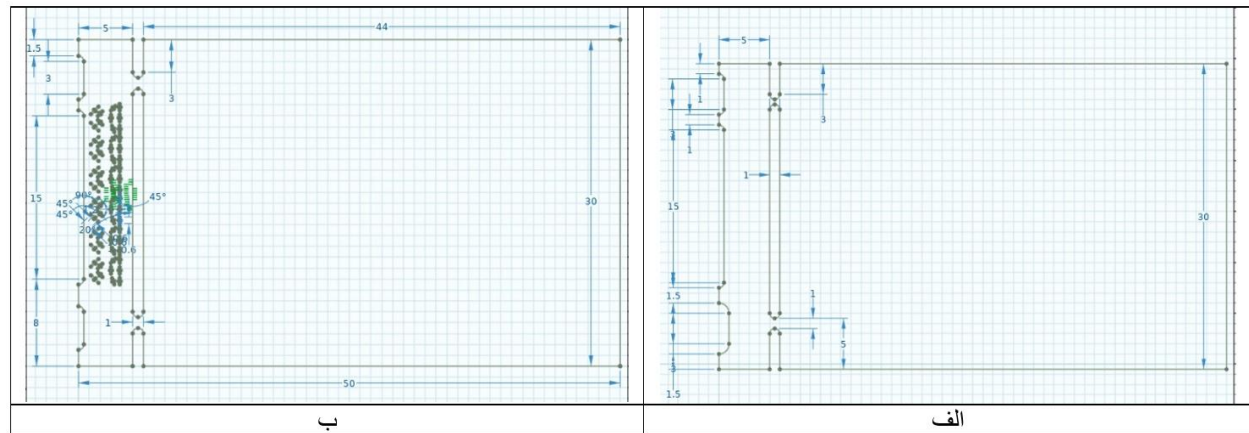
هندسه سایبان

یک نمای دوپوسته می‌تواند تحت تأثیر پارامترهای زیادی مانند پارامترهای هندسی، نوع تهویه، ویژگی‌های سایبان و مسیر جریان هوا قرار گیرد. این مطالعه بر روی تأثیر عدم وجود سایبان و هندسه سایبان بر رفتار انتقال حرارت همرفتی در حفره نمای دوپوسته و تأثیر آن بر تغییرات حرارت در اتاق متصل به سایبان می‌باشد. لذا براین اساس در سه حالت بدون سایبان، سایبان مورب ۴۵ درجه و سایبان چندلایه چند جهته، رفتار جریان هوا بر روی نمای دوپوسته یک طبقه متمرکز شده است و برای خلاصه‌سازی به ترتیب، هندسه ۱، هندسه ۲ و هندسه ۳ نامیده می‌شود.

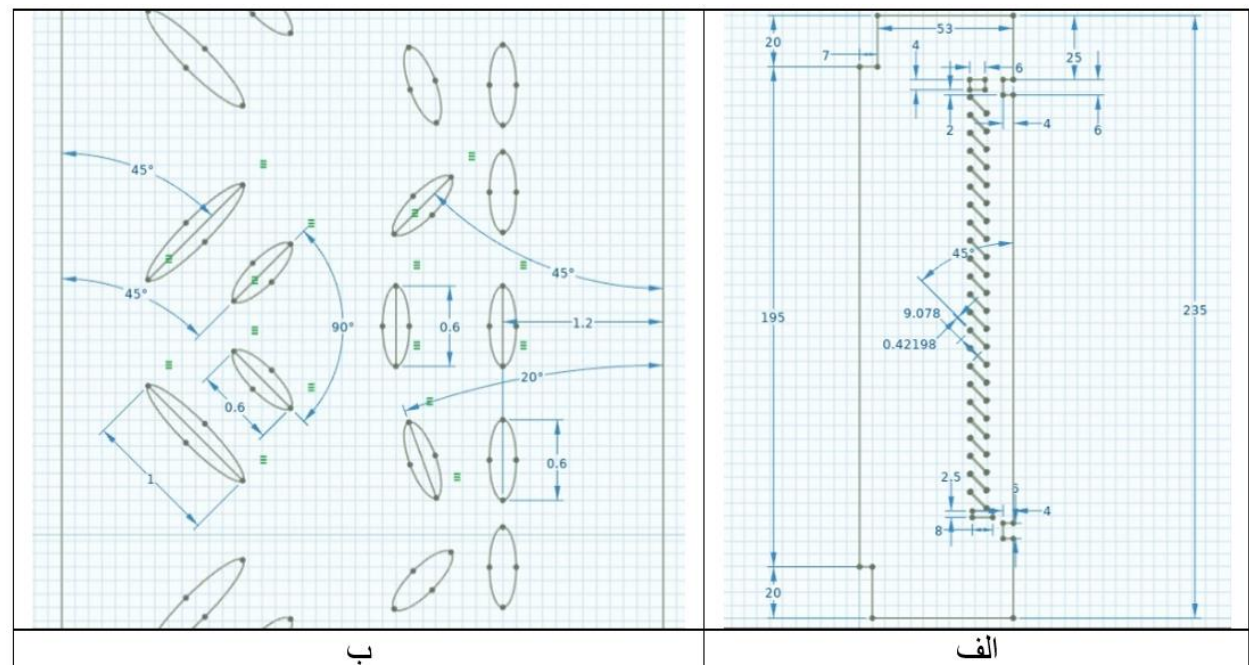
گرفته است [۱۳]. به طور مشابه، مطالعاتی را در شهرهای مختلف با آب و هوای متمایز برای تعیین تأثیر انواع پنجره، سایبان و موقعیت‌یابی بر انرژی مورد نیاز خنک کردن ساختمان انجام دادند [۱۴].

در بررسی ویژگی سطحی سایبان درون محفظه، نشان داده شده تیغه‌های سایبان درون حفره نمای دوپوسته بر جریان سیال هوا در لایه‌های میانی و داخلی اثر گذاشته و به آن شکل و جهت می‌دهد و در عین حال با ایجاد فاصله کافی از سطح شیشه امکان تأمین جریان هوا در دو طرف تیغه‌ها فراهم می‌آورند. [۱۵-۱۷]. در تحقیقات بررسی شده، انواع مختلف سایبان مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است [۲۳-۱۸]. علاوه بر این، بررسی پژوهش‌ها نشان داده است که دستگاه‌های سایه‌انداز عمدتاً از نظر گونه‌شناسی تحلیل می‌شوند، در حالی که تأثیر بر مصرف انرژی برای مکان‌های آب و هوایی خاص متمرکز است. علاوه بر این‌ها، اشکال و هندسه دستگاه‌های سایه‌بان و تأثیر آن بر جریان همرفت و سیال درون حفره از جمله موضوعاتی است که کمتر به تجزیه و تحلیل آن پرداخته شده است. از طرف دیگر سیستم‌های مبدل حرارتی همرفتی رفتاری مشابه نماهای دوپوسته جهت هدایت حرارتی از خود نشان می‌دهند [۲۶-۲۴]. در تحقیقاتی که در سیستم‌های مبدل حرارت صنعتی، که در فرآیندهایی مانند تأسیسات سرمایش و گرمایش و تهویه مطبوع در صنایع بطور گسترده کاربرد دارند، نشان داده شده که وجود ساختار چندلایه با هندسه متفاوت باعث افزایش سرعت هوا در مسیر عبور سیال و در نتیجه بهبود هدایت همرفتی در فرایند انتقال حرارت می‌شود [۲۷]. لذا از اینرو انتظار می‌رود تماس و برخورد بیشتر جریان هوا با سایبان باعث شناوری بیشتر، افزایش سرعت و دما سیال هوا در حفره، و بهبود جریان همرفتی به واسطه افزایش سرعت سیال در نمای دوپوسته شود [۲۸-۳۰].

هدف این مقاله ارزیابی تأثیر هندسه دستگاه سایه‌انداز در رابطه با بهبود عملکرد انرژی در یک ساختمان با نمای دوپوسته جنوبی و تأثیر گرم شدن سایبان بر جریان همرفتی درون حفره است. منطقه اقلیمی شهر سمنان به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است که مطالعات مشابه قبلی برای این منطقه انجام نشده است. علاوه بر این، در دهه گذشته، ساخت



شکل ۱- مدل شبیه‌سازی ساختمان با نمای دوپوسته در سمت جنوب و اتاق ضمیمه، الف) هندسه ۱، ب) هندسه ۳



شکل ۲- چیدمان سایبان در درون نمای دو پوسته، الف) هندسه ۲، ب) هندسه ۳

دوپوسته خارجی قرار دارند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بهترین موقعیت برای لوورها نزدیک به لایه بیرونی است تا در عین حال فاصله کافی از سطح شیشه برای تأمین جریان هوا در دو طرف تیغه‌ها حفظ شود [۳۲]. در هندسه ۳، کرکره‌ها در ۴ لایه در زوایای ۴۵، ۳۵، ۲۰ و ۱۵ در ۴ محور عمودی حفره، نزدیک به پوست بیرونی به دلیل جدا شدن در جریان هوای عبوری بین پره‌ها قرار دارند.

سایبان هندسه ۲ و هندسه ۳ دارای دو نوع لوور مختلف از جنس آلومینیوم هستند که از نظر موقعیت تیغه‌ها نسبت به یکدیگر و زاویه تیغه‌ها نسبت به خط افقی تفاوت دارند و در شکل ۲ نشان داده شده است. در هندسه ۲، لوورها به صورت مورب و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به خط افق رو به نمای ساختمان هستند شکل ۲ الف و در هندسه ۳، تیغه‌های چند لایه در زوایای مختلف نسبت به خط افق در درون حفره قرار می‌گیرند شکل ۲ ب نشان داده شده است. در هندسه ۲، پرده‌ها در زاویه ۴۵ و در ۱۲ محور از عمق حفره، نزدیک به

حل عددی و شرایط مرزی

به منظور حل عددی و شرایط مرزی مدل در این کار برای ارزیابی عملکرد جریان تهویه طبیعی آشفته در یک نمای دوپوسته دو بعدی با سایبان، جریان هوا در نمای دوپوسته در حالت پایدار- آشفته در نظر گرفته می-شود. برای جریان های تراکم ناپذیر دوبعدی، معادلات حرکت و بقای انرژی مطابق معادلات ۱، ۲ و ۳ هستند:

$$1 \quad \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{معادله حفظ جرم}$$

$$2 \quad \rho(\partial v / \partial t + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho f \quad \text{معادله مومنتوم}$$

$$3 \quad \rho C_p(\partial T / \partial t + v \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad \text{معادله شار گرما}$$

که در آن ρ چگالی سیال، v سرعت سیال، t زمان، p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، f نیروی حجمی اعمال شده به سیال، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال در فشار ثابت، T دمای سیال، k هدایت حرارتی سیال، Q منبع گرما است.

$$4 \quad \tau = -pI + \mu \nabla u \quad \text{معادله تانسور تنش سیال}$$

در این معادله، τ تانسور تنش است که یک ماتریس ۳ در ۳ است، p فشار سیال است، I ماتریس ۳ در ۳ است، μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است، u سرعت سیال است و ∇ عملگر گرادیان است. تلاطم با استفاده از مدل استاندارد $k-\epsilon$ مدل سازی می شود. جریان کاملاً متلاطم فرض می شود. مدل استاندارد $k-\epsilon$ فقط برای جریان های کاملاً آشفته معتبر است. مدل $k-\epsilon$ آشفته برای محاسبه جریان سیال و انتقال حرارت در یک حفره شامل کور پیاده سازی شده و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی مقایسه می شوند. انرژی جنبشی آشفته k و سرعت اتلاف آن ϵ از معادلات زیر محاسبه می شود:

$$5 \quad \partial \rho k / \partial t + \partial(\rho k u_i) / \partial x_i = \partial / \partial x_i (\Gamma_k \partial k / \partial x_i) + G_k - \rho \epsilon$$

معادله سرعت اتلاف انرژی جنبشی آشفته (ϵ)

$$6 \quad \partial \rho \epsilon / \partial t + \partial(\rho \epsilon u_i) / \partial x_i = \partial / \partial x_i (\Gamma_\epsilon \partial \epsilon / \partial x_i) + C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon (k / \epsilon) - C_3 \rho \epsilon^2 / (\eta(\mu + \mu_t))$$

در معادله انرژی جنبشی آشفته (k)، ρ چگالی سیال، u_i سرعت سیال در جهت i ، Γ_k ضریب پخش آشفته برای k ، G_k سرعت تولید k ، ϵ سرعت اتلاف k و در معادله

سرعت اتلاف انرژی جنبشی آشفته (ϵ)، Γ_ϵ ضریب پخش آشفته برای ϵ ، C_1 ، C_2 و C_3 ضرایب ثابت مدل $k-\epsilon$ ، η ویسکوزیته مولکولی، μ_t است. جهت محاسبه ویسکوزیته آشفته از رابطه زیر استفاده می شود.

$$\mu_t = C_1 \rho K^2 / \epsilon \quad \text{ویسکوزیته آشفته}$$

در این رابطه، C_1 یک ثابت تجربی است که بسته به نوع جریان و شرایط مرزی می تواند متفاوت باشد. برای محاسبه چگالی از مدل بوسینسک استفاده شده است:

$$8 \quad \rho(z, T) = \rho_0 [1 - \alpha(z - z_0) + \beta(T - T_0)] \quad \text{چگالی در مدل بوسینسک}$$

در اینجا، $\rho(z, T)$ چگالی سیال در ارتفاع z و دمای T است، ρ_0 چگالی مرجع سیال در ارتفاع مرجع z_0 و دمای مرجع T_0 ، α ضریب انبساط حرارتی حجمی سیال، β ضریب انبساط حرارتی ایزوبار یک سیال، z ارتفاع از سطح مرجع z_0 ، T دما از دمای مرجع T_0 است. این مدل در صورتی استفاده می شود که اختلاف دما در دامنه کم باشد. تابش با استفاده از مدل تشعشعات DO مجزا مدل سازی می شود. تابش در موقعیت ۲ و در جهت S است.

$$9 \quad dl(s, r) / dr = -\alpha(r)l(s, r) + S(s, r) \quad \text{انتقال تابش (RTE) برای یک محیط تکفازی همسانگرد}$$

در اینجا، $l(s, r)$ شدت تابش در جهت S و در موقعیت ۲، S بردار واحد در جهت انتشار تابش، r بردار موقعیت در فضای فیزیکی، $\alpha(r)$ ضریب کلی جذب-پراکندگی است که ترکیبی از ضریب جذب (α_a) و ضریب پراکندگی (α_s)، $S(s, r)$ منبع تابشی در جهت S و در موقعیت ۲ است. مدل تابش DO طیف تابش را به باندهای طول موج N تقسیم می کند. فواصل طول موج در نظر گرفته شده است. معادله انتقال تشعشعی در هر بازه طول موج ساخته شده است، که منجر به معادلات انتقال برای کمیت I می شود و رفتار در هر نوار خاکستری فرض می شود. این مدل، مدل باند خاکستری نامیده می شود و برای مدل سازی تشعشعات غیر خاکستری استفاده می شود. شرایط مرزی در هندسه دو بعدی اعمال می شود و سه نوع شرایط مرزی مطالعه می شود: ورودی هوا، خروجی و دمای دیوار. سرعت های ورودی در ۰/۵، ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۲ متر بر ثانیه متغیر است. خروجی به عنوان یک مرز خروجی مدل سازی می شود در حالی که جریان کاملاً توسعه یافته است. دمای شیشه داخل و خارج و شار حرارتی سایبان بر اساس ساعت

روز داده شده است. همچنین کرکره داخل نمای دوپوسته به عنوان یک ماده مات تنظیم می‌شود.

مدل محاسباتی

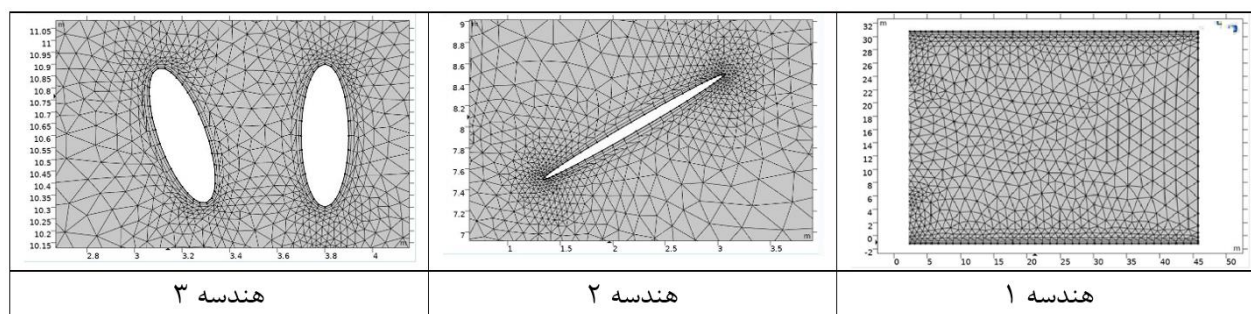
در تحقیق حاضر، جهت طراحی نمای دوپوسته به کمک کامپیوتر از نرم‌افزار مدل‌سازی سالدورک ۲۰۲۲ استفاده شد. از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک ۶ جهت محاسبه دینامیک سیالات محاسباتی برای حل معادلات ناویر-استوکس و جریان آشفته به روش حجم محدود استفاده شد. استفاده از طرح‌های گسسته‌سازی مختلف و الگوریتم‌های حل، همراه با انواع مختلف شرایط مرزی را امکان‌پذیر می‌سازد. به منظور طراحی دو بعدی ساختمان، سازه نمای دوپوسته و سایبان‌های مورب و چند لایه، از نرم‌افزار سالدورک برای ترسیم هندسه و اجزای مختلف ساختار استفاده گردید.

برای ایجاد شبکه مورد نیاز برای حل‌کننده در نرم‌افزار کامسول استفاده از یک شبکه با عناصر مثلثی استفاده می‌شود. سایبان‌ها با استفاده از یک طرح مش‌بندی مدل مثلث غیریکنواخت با نسبت ۰/۱ به عناصر تقسیم‌بندی شدند. این نسبت مشخص می‌کند که آیا گره‌ها متراکم‌تر خواهند بود یا خیر، و همچنین شدت توزیع را مشخص می‌کند. علاوه بر این روش مش‌بندی، انطباق شبکه توسط خود حل‌کننده در شکاف بین سایبان و دیوار با ایجاد ۱۰ لایه مرزی برای هر المان سایبان در منطقه فعال جهت بهبود شبکه انجام شد، که در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۴ توپولوژی مش محاسبات دامنه را نشان می‌دهد. کیس دو بعدی بیش از ۱۸۵۰۰۰ سلول و ۱۱۳۵۱۰ گره تولید می‌کند. به عنوان یک معیار همگرایی در کار حاضر، حل‌کننده معادلات را تکرار می‌کند تا زمانی که در یک مقدار ثابت تثبیت شود. برای اولین لایه از عناصر دیوار، یک تابع شکل ویژه برای شبیه‌سازی

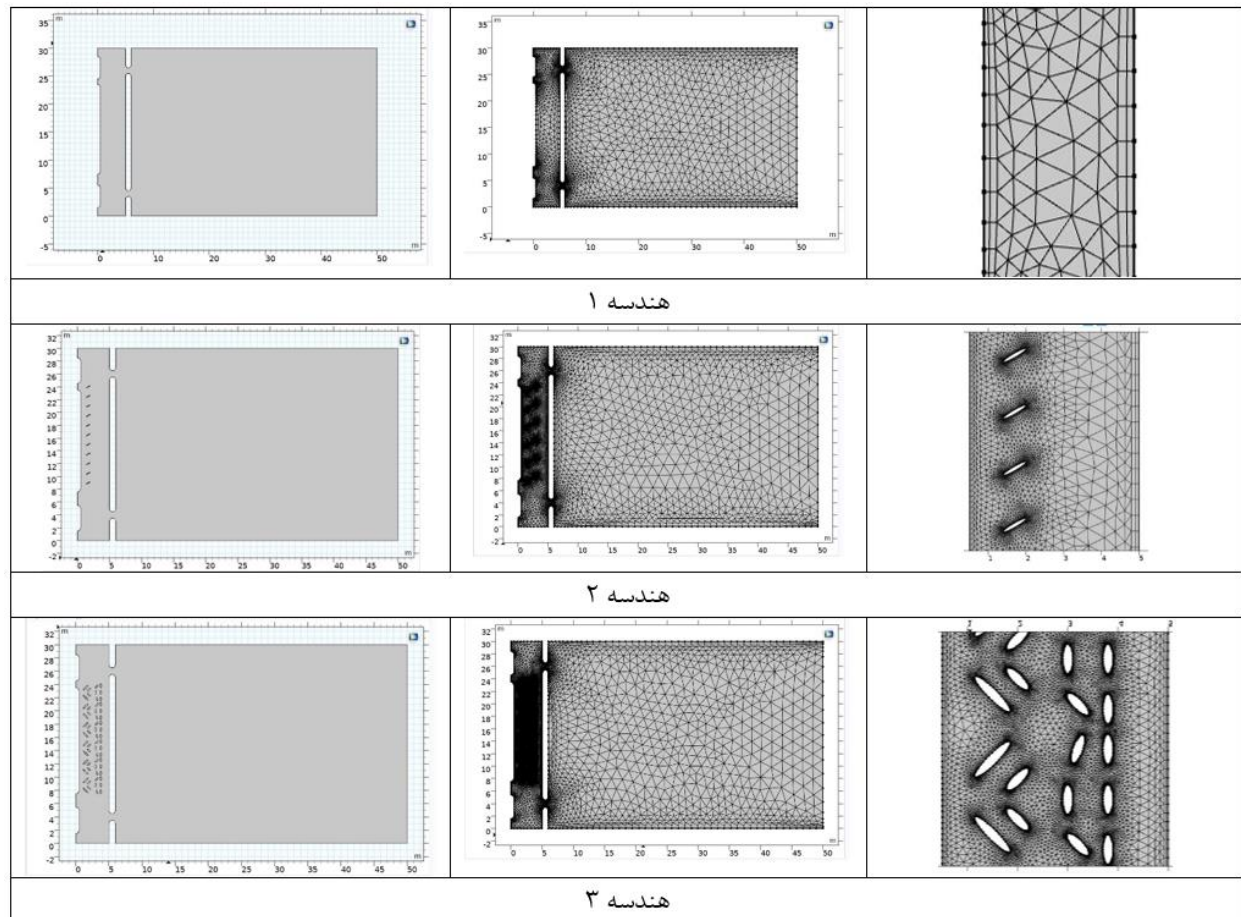
پروفیل سرعت آشفته جهانی با y^+ در مرتبه 10^{+3} برای شبکه‌ها استفاده می‌شود. تجزیه و تحلیل به ۱۴۰۰ تکرار برای همگرایی کافی نیاز دارد. شبیه‌سازی با دستیابی به همگرایی ۵-۱۰^{-۸} انجام شد. برای مدل‌سازی ساختمان، به دلیل ابعاد زیاد و پیچیدگی، از مش‌بندی‌های ساده‌تر استفاده شد. نوع مش کنترل شده فیزیک انتخاب شد و سائز مش درشت برای محاسبات استفاده شد.

برنامه شبیه‌سازی انرژی ساختمان

کامسول مولتی فیزیک ۶ یک برنامه شبیه‌سازی انعطاف‌پذیر است که در زمینه‌های مهندسی مکانیک، سیالات، مواد، الکترونیک و جهت شبیه‌سازی ساختار با متریکال‌های مختلف به خوبی عمل می‌کند. بنابراین در شبیه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و ساختمان‌های غیرفعال و فعال خورشیدی می‌تواند استفاده شود. در نرم‌افزار کامسول جهت شبیه‌سازی نمای دوپوسته ابتدا مدل هندسی دقیق از نمای دوپوسته را با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار سالدورک ایجاد شد و سپس در فرمت مشترک به نرم‌افزار کامسول منتقل گردید. از مش‌بندی با عناصر چندوجهی برای هندسه‌های پیچیده نمای دوپوسته استفاده شد. شرایط مرزی دما برای هر دوپوسته و همچنین برای محیط اطراف، شار تابشی ورودی و ضریب بازتاب و ضریب انتقال حرارت همرفتی برای هر دوپوسته و همچنین برای محیط اطراف تعریف شد. معادلات انتقال حرارت انتقال حرارت پایدار را برای شبیه‌سازی انتقال حرارت بین دوپوسته‌ها و محیط اطراف انتخاب و خواص حرارتی (مانند هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی و چگالی) برای مواد بکار رفته در مدل تعریف معادلات با استفاده از یک روش اجزای محدود حل گردید.



شکل ۳- لایه مرزی برای هر المان در منطقه فعال سایبان مش بندی نمای دوپوسته



شکل ۴- مدل ۲ بعدی از نمای دوپوسته به همراه ساختمان ضمیمه، مش بندی مدل ۲ بعدی، مش بندی نمای دوپوسته

مدل سازی انرژی اتاق ضمیمه

برای افزایش دقت در شبیه سازی مواد مورد استفاده در پاکت ساختمانی، از مواد مرسوم در ساختمان ها استفاده شد. غشاء داخلی و خارجی پاکت ساختمانی از شیشه و سایبان درون حفره پاکت از آلومینیوم تشکیل شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی این مواد در جدول ۱- مشخص شده اند. شبیه سازی بر روی یک ساختمان مسکونی تک واحدی با نمای جنوبی و پاکت ساختمانی دوپوسته انجام شد. از اصطلاح "اشری" که مخفف انجمن گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا که از سال ۲۰۱۷ که در نرم افزار کامسول تعریف شده است، برای توصیف شرایط آب و هوایی شهر سمنان در روز ۱۵ مرداد ۲۰۲۱ استفاده شد.

در شرایط گرم، کانال هوا در نمای دوپوسته برای انتقال حرارت غیرفعال از طریق تهویه طبیعی (همرفت) استفاده می شود. شبیه سازی شرایط جریان هوا با سرعت های مختلف،

دریچه های ورودی و خروجی و جریان هوا بررسی شده است. انتقال حرارت در پاکت ساختمانی دوپوسته در شرایط گرم براساس شار گرما مدل سازی شده و جریان شار حرارتی همرفتی در دیواره عمودی اعمال شده است. از معادلات ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ جهت محاسبه انتقال حرارت همرفتی برای حل شار حرارتی استفاده شده و پارامترهای مختلف سیال و انتقال حرارت در حالت مولتی فیزیک مورد مطالعه قرار گرفته اند.

۱۰	$h_{conv} = Nu * k / L$	محاسبه ضریب انتقال حرارت همرفتی
۱۱	$Nu = 0.664 * Re^{0.5} * Pr^{0.33}$	محاسبه عدد ناسلت
۱۲	$Re = \rho * v * L / \mu$	عدد رینولدز
۱۳	$Pr = \mu * cp / k$	عدد پراوندل

که در آن، h_{conv} ضریب انتقال حرارت همرفتی (W/m^2K)، Nu عدد ناسلت (بدون واحد) است که هندسه و شرایط جریان سیال، k هدایت حرارتی سیال (W/mK) و L طول

مشخصه (m) را نشان می‌دهد. همچنین، چگالی سیال ρ (kg/m³)، سرعت سیال v (m/s)، ویسکوزیته دینامیکی سیال (Pa·s) و cp ظرفیت حرارتی سیال در فشار ثابت $J/(kg \cdot K)$ است. در حل مسئله اثرات فاصله‌دهنده یا قاب جداکننده شیشه‌ها شامل نمی‌شود و هدایت صرفاً از طریق ناحیه بازشوها در نظر گرفته می‌شود.

اعتبار سنجی

یکی از اساسی‌ترین ویژگی‌های شبیه‌سازی تعیین اعتبار مقادیر بدست آمده و مقایسه مقدار خطای آن با منابعی که براساس آن شبیه‌سازی صورت گرفته است، بنابراین سرعت‌های مختلف هوا در ورودی بررسی و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که سرعت، $0/05$ متر بر ثانیه، تقریباً سرعت جریان هوا در ورودی را نشان می‌دهد، زمانی که دما از طریق سایبان با داده‌های تجربی مقایسه شده است. با این وجود، تفاوت کوچکی بین شبیه‌سازی و آزمایش‌ها وجود دارد، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار انحراف بین $0/8$ تا $1/03$ درصد برای سرعت ورودی $0/05$ متر بر ثانیه بود.

یافته‌ها

سرعت جریان سیال

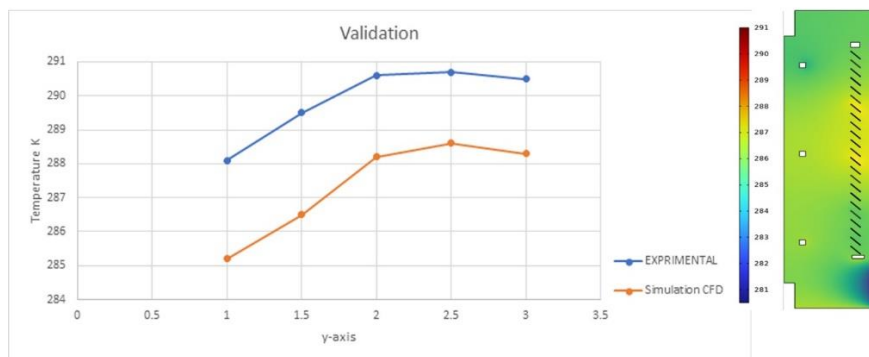
در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر هندسه سایبان و سرعت جریان هوا بر عملکرد حرارتی پاکت دوپوسته در اقلیم گرم و خشک سمنان، از شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها با سه سرعت جریان هوا (۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه) و در حالی که دمای هوای بیرون ۵۰

درجه سانتیگراد بود، دمای جریان هوا قبل از ورود به ساختمان با استفاده از روش عبور از میان مواد تغییر فاز دهنده تا ۲۳ درجه سانتیگراد کاهش داده شد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که هندسه و سرعت جریان هوا بر سرعت و آشفته‌گی جریان هوا در داخل حفره پاکت دوپوسته تأثیرگذار است. بگونه‌ای که با افزایش عدد رینولدز (ناشی از افزایش سرعت جریان)، جریان هوای ورودی به حفره از حالت آرام به آشفته تبدیل می‌شود که در همه موارد منجر به افزایش عدد ناسلت و کاهش شار حرارتی گردید.

تغییرات درجه حرارت در داخل ساختمان مسکونی با سرعت ۱ متر بر ثانیه در شکل ۶ قابل مشاهده است. در نمودار ۱-الف، دمای هوای در کف ساختمان ۳۸ درجه سانتیگراد است و با افزایش ارتفاع به سمت سقف، دما افزایش می‌یابد تا اینکه در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به ۴۱ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۲-الف، دمای هوای در کف ساختمان ۳۲/۵ درجه سانتیگراد است و با صعود به سمت سقف، دما افزایش یافته و در بالاترین نقطه به ۳۴/۱ درجه سانتیگراد می‌رسد. همچنین در نمودار ۳-الف، دمای هوای در کف ساختمان ۲۸/۰۷ درجه سانتیگراد است و با افزایش ارتفاع به سمت سقف، دما افزایش می‌یابد و در بالاترین نقطه به ۲۸/۱۸ درجه سانتیگراد می‌رسد. در تمام سه حالت، با افزایش ارتفاع از کف ساختمان به سمت سقف، دمای هوا نیز افزایش می‌یابد. اختلاف دمای بین کف و سقف در حالت اول (نمودار ۱-الف) بیشترین مقدار را داشته و در حالت سوم (نمودار ۳-الف) کمترین مقدار را دارد.

جدول ۱: خواص فیزیکی مواد استفاده شده در شبیه سازی

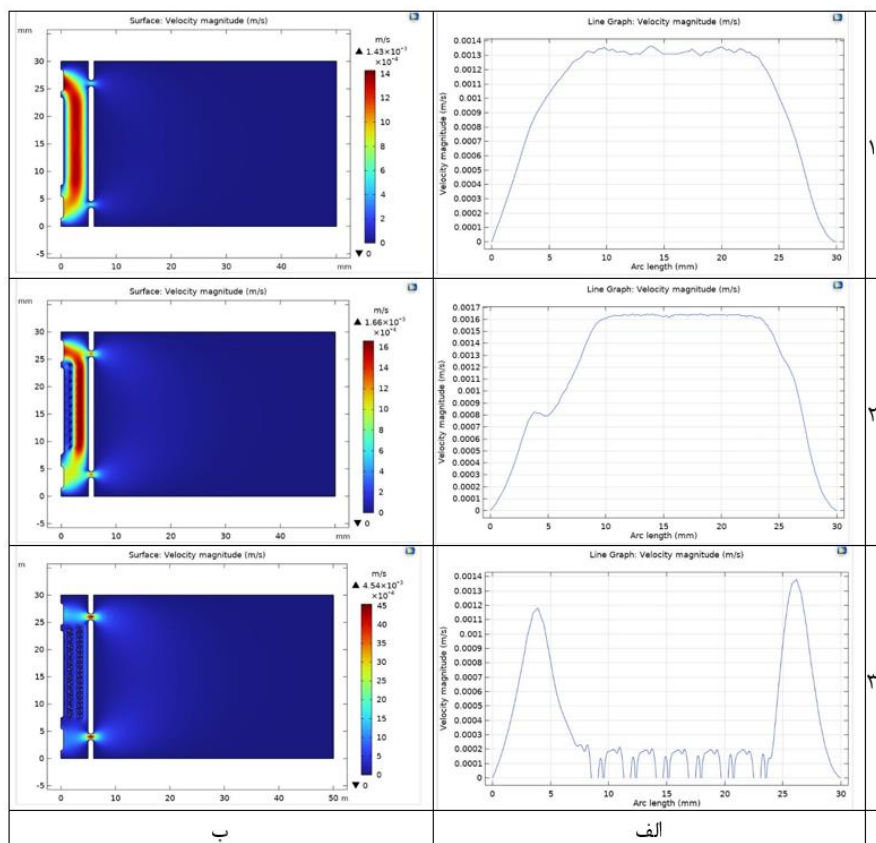
ویژگی	هوا	آلومینیوم	شیشه
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱/۹۵	۲/۷	۲۴۰۰
هدایت حرارتی (وات بر متر کلون)	۱	۲۰۲/۴	۱
ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم کلون)	۱۰۰۰	۸۷۱	۸۴۰
ضریب شکست	-	۱/۵	۰/۱۵
ضریب جذب (۱ بر متر)	-	۰/۴	۰/۴
ضریب تابندگی	۰/۹	۰/۶۵	۰/۸۴



شکل ۵- اعتبار سنجی شبیه سازی نظری در سرعت ۰.۰۵ متر بر ثانیه

جدول ۲: حداکثر و حداقل سرعت جریان سیال درون پاکت دوپوسته در سرعت جریان هوا در ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه

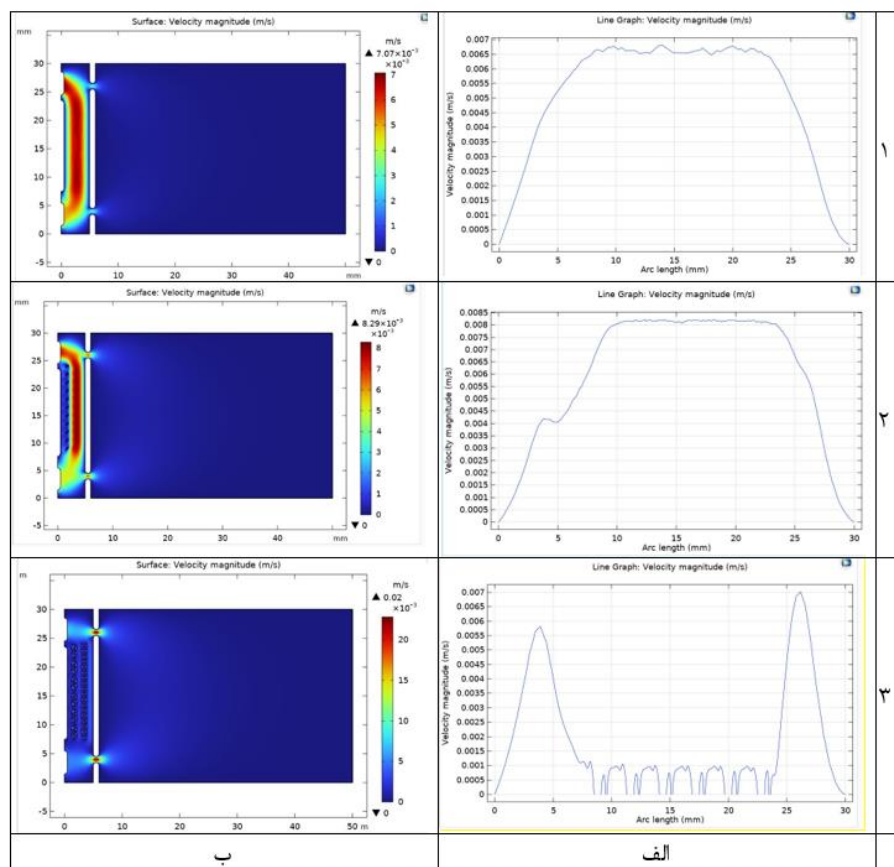
	۱ متر بر ثانیه		۵ متر بر ثانیه		۱۰ متر بر ثانیه	
	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
هندسه ۱	۱/۳	۱/۳	۶/۸	۶/۸	۱۳/۵	۱۳/۵
هندسه ۲	۱/۶	۰/۸	۸/۲	۴/۲	۱۶/۵	۱۳/۵
هندسه ۳	۱/۲	۰/۲	۱/۱	۵/۸	۱۱/۳	۲/۲



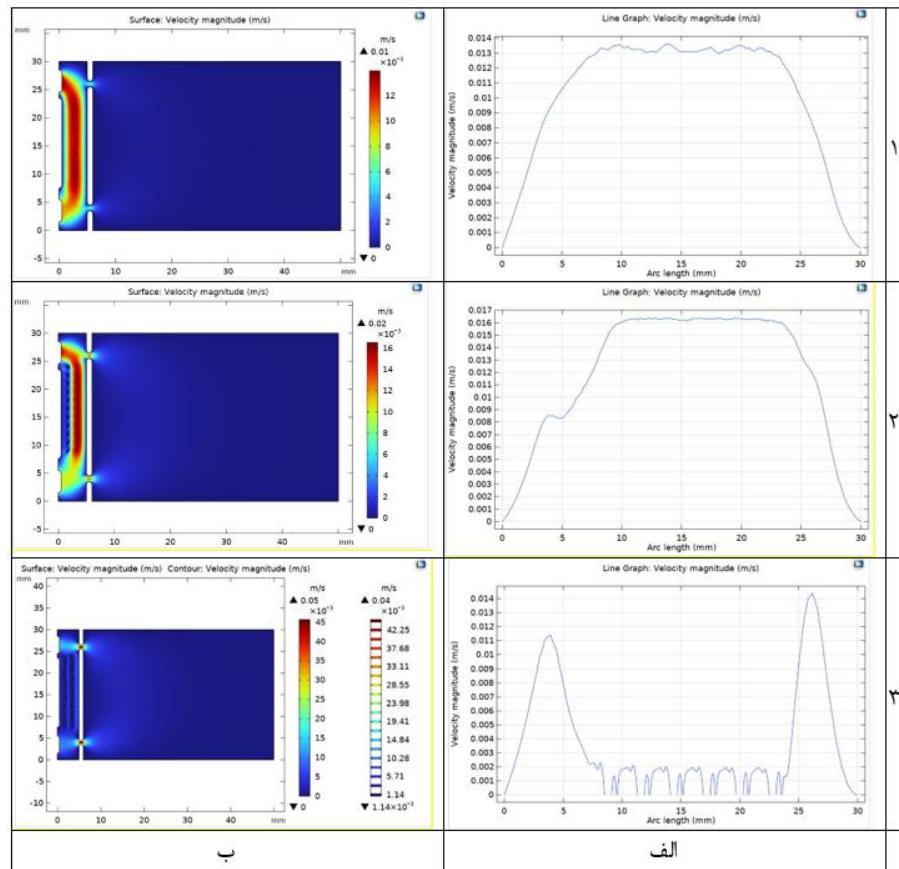
شکل ۶- الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱ متر بر ثانیه، ب) نحوه حرکت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته

بصورت غیر یکنواخت در قسمت‌های مختلف متفاوت است و در سریع‌ترین قسمت در درون هسته حداکثر به ۱/۱ متر بر ثانیه رسیده و سپس کاهش می‌یابد. این تغییرات سرعت شدید در درون هسته و افت شدید سرعت نشان دهنده تبدیل جریان لمینار به جریان آشفته در درون حفره پاکت دوپوسته می‌باشد. در شکل ۷، ۱-ب، ۲-ب و ۳-ب تغییرات سرعت در درون حفره پاکت ساختمانی بصورت گرافیکی نشان داده شده است. در شبیه‌سازی دوم، با افزایش سرعت باد ورودی به سیستم و ثابت نگه داشتن دمای سطح بیرونی، رفتار جریان هوا در داخل حفره پاکت دوپوسته به طور قابل توجهی تغییر کرد. در همه مدل‌ها، سرعت جریان هوا پس از ورود به حفره، تحت تأثیر عواملی مانند گرمای داخل حفره و شکل هسته، دچار نوسانات شدیدی شد. در مدل با هسته مورب، سرعت جریان ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت. اما در هندسه ۳، تغییرات سرعت بسیار پیچیده‌تر بود و جریان هوا از حالت آرام به حالت آشفته تغییر کرد.

در شبیه‌سازی دوم با ثابت بودن دمای در جداره بیرونی و دمای ورودی سرعت جریان هوا به ۵ متر بر ثانیه افزایش داده شد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود در نمودار ۱-الف) جریان هوایی که با سرعت ۵ متر بر ثانیه وارد می‌گردد به سرعت تحت تأثیر گرمای درون حفره پاکت دوپوسته قرار گرفته و سرعت آن تا ۶/۸ متر بر ثانیه افزایش یافته و تا نقطه خروجی تقریباً ثابت است. این در حالی است که در نمودار ۲-الف) جریان هوا پس از ورود و برخورد با هسته مورب سرعت آن در ۴/۲ متر بر ثانیه ابتدا متوقف می‌شود اما به دلیل یکنواخت بودن هسته سرعت جریان بلافاصله افزایش یافته و به ۸/۲ متر بر ثانیه می‌رسد. در نمودار ۳-الف) در هندسه ۳ سرعت جریان هوا رفتار کاملاً متغیری را نسبت به دو نمونه پیشین از خود نشان می‌دهد. به گونه‌ای که در ابتدا و پیش از رسیدن به هسته سرعت جریان هوا تا ۵/۸ متر بر ثانیه افزایش می‌یابد، اما پس از برخورد به هسته سرعت آن بطور متناوب تغییر می‌کند. سرعت جریان هوا در درون هسته



شکل ۷- الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۵ متر بر ثانیه، ب) نحوه حرکت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته



شکل ۸-الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، ب) نحوه حرکت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته

در شکل ۹ تغییرات سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه با یکدیگر مقایسه شد، که در نتیجه در هندسه ۱ بیشترین سرعت و در هندسه ۳ کمترین سرعت جریان مشاهده شد. همچنین در شکل ۱۰ حداکثر و حداقل سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت های در سرعت ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه با هندسه ۱، ۲ و ۳ با یکدیگر مقایسه شده اند. هندسه ۲ بالاترین سرعت را در میان سایر هندسه ها در هر سه سرعت جریان ورودی مشاهده شد، در حالی که هندسه ۳ در هر سه سرعت از کمترین حداقل سرعت برخوردار بود.

تغییرات دمای داخل ساختمان

رفتار سیال هوا در داخل حفره نمای دو دوپوسته، موجب تغییر سرعت جریان و تبدیل جریان آرام به آشفته می گردد و در نتیجه انتقال حرارت را از حالت تابش و رسانش به همرفت

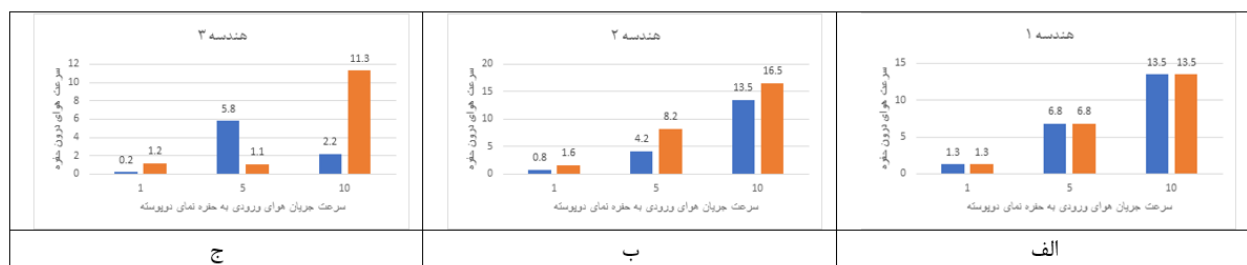
تبدیل می کند. این امر موجب افزایش عدد ناسلت و سرعت خنک شدن شده و در نتیجه با افت دما همراه است. شبیه سازی نمای دوپوسته در پاکت ساختمانی می تواند تغییرات دمای سیال هوا در داخل نمای دوپوسته و واحد مسکونی را نشان دهد. بنابراین نتایج حاصل از شبیه سازی در سه سرعت مختلف جریان هوا در داخل حفره پاکت نشان می دهد که مقادیر دما در داخل ساختمان متغیر بوده و هندسه نقش مهمی در انتقال حرارت ایفا می کند.

در جدول ۳ تغییرات درجه حرارت در داخل ساختمان مسکونی نشان داده شده است. در سرعت ۱ متر بر ثانیه، دمای هوا در کف ساختمان ۵۰ درجه سانتیگراد است و با افزایش ارتفاع به سمت سقف، دما افزایش می یابد تا اینکه در بالاترین نقطه ساختمان به ۵۵ درجه سانتیگراد می رسد. در سرعت ۵ متر بر ثانیه، دمای هوا در کف ساختمان ۴۸/۵ درجه سانتیگراد است و با صعود به سمت سقف، دما افزایش یافته و

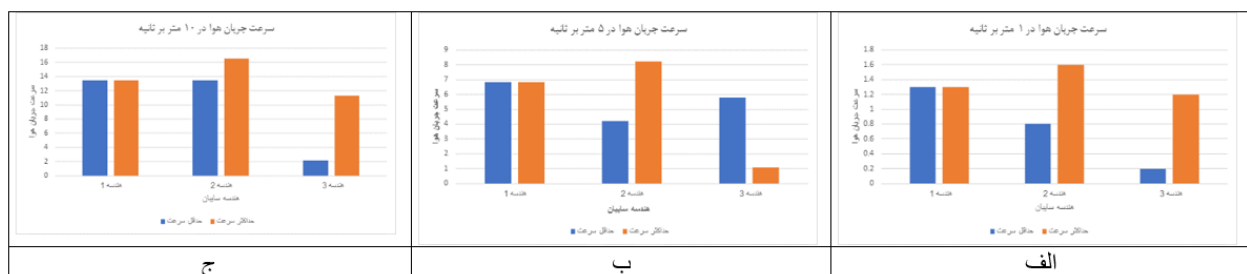
بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به ۵۵ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۲-الف دمای هوای در کف ساختمان ۴۸/۵ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به ۵۰/۴ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۳-الف دمای هوای در کف ساختمان ۴۵/۵ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به ۴۷ درجه سانتیگراد می‌رسد. در سرعت جریان هوای ۱ متر بر ثانیه، اختلاف دما در هندسه ۱ به میزان ۹ درصد بود، در هندسه ۲ به میزان ۳/۱ درصد و در هندسه ۳ به میزان ۳/۱ درصد بود، که نشان دهنده دمای هوای یکنواخت‌تر در درون ساختمان دارد.

در بالاترین نقطه به ۵۰/۴ درجه سانتیگراد می‌رسد. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، دمای هوا در کف ساختمان ۴۵/۵ درجه سانتیگراد است و با افزایش ارتفاع به سمت سقف، دما افزایش می‌یابد و در بالاترین نقطه به ۴۷ درجه سانتیگراد می‌رسد، شکل ۱۱ نمودارهای تغییرات دمای سیال هوا درون ساختمان در سرعت ثابت در مقایسه با هندسه متفاوت را نشان می‌دهد. دلیل افزایش دما در زمان عبور از نمای دوپوسته گرمای حبس شده در فضای بین دو شیشه و وجود سایبان فلزی در اثر شار تابشی حرارتی می‌باشد.

همانطور که در نمودار شکل ۱۲ تغییرات درجه حرارت در درون ساختمان مسکونی از کف تا سقف در سرعت ۱ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف دمای هوای در کف ساختمان ۵۰ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در



شکل ۹- تغییرات سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت‌های ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، (الف) هندسه ۱ (ب) هندسه ۲ (ج) هندسه ۳



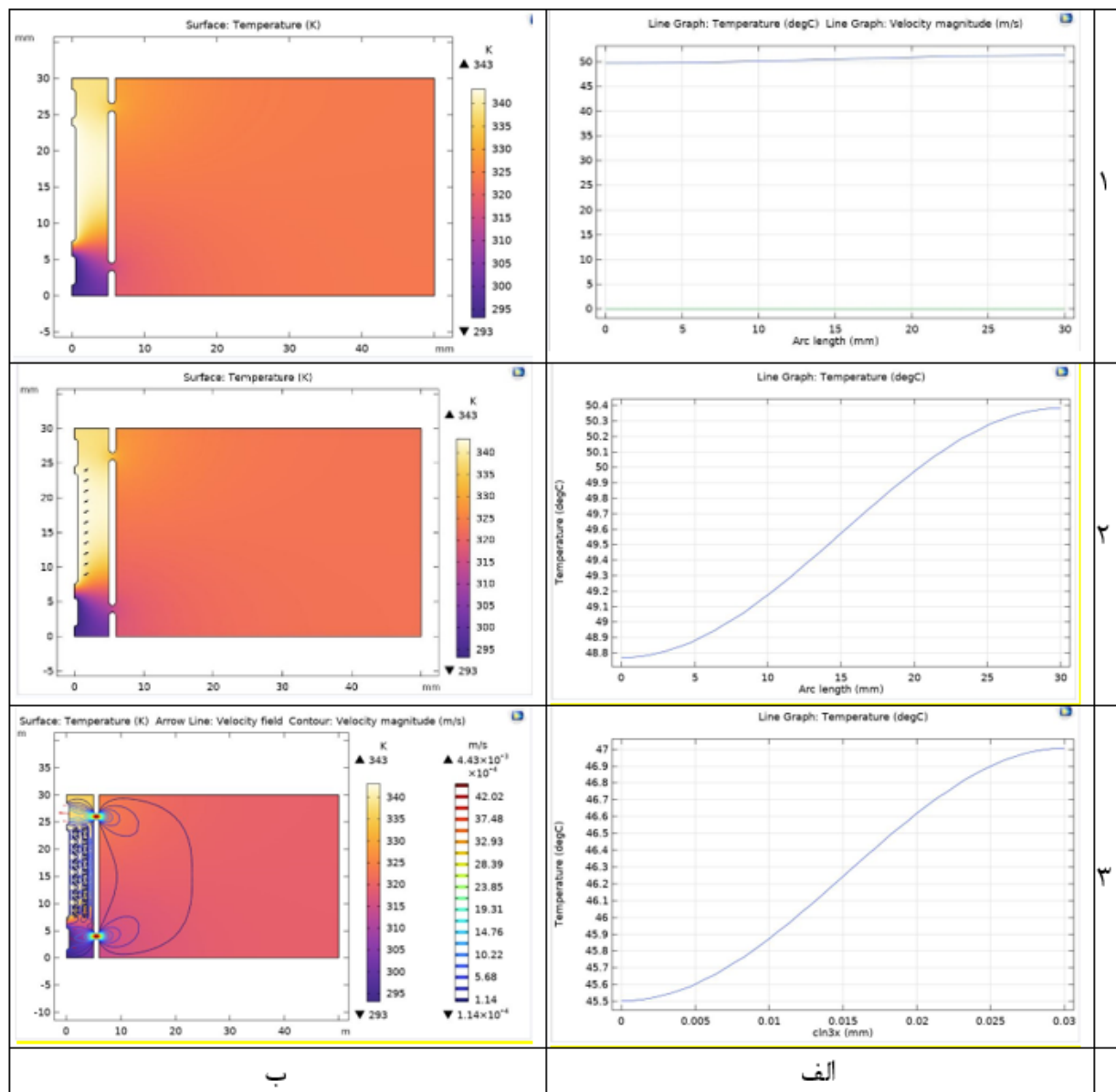
شکل ۱۰- تغییرات سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ثابت در مقایسه با هندسه متفاوت، (الف) ۱ متر بر ثانیه (ب) ۵ متر بر ثانیه (ج) ۱۰ متر بر ثانیه

جدول ۳: حداکثر و حداقل دمای ساختمان در سرعت جریان هوا در ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه

	۱۰ متر بر ثانیه		۵ متر بر ثانیه		۱ متر بر ثانیه		
	حداقل (C°)	حداکثر (C°)	حداقل (C°)	حداکثر (C°)	حداقل (C°)	حداکثر (C°)	
هندسه ۱	۳۸	۴۱	۴۵	۴۹	۵۰	۵۵	
هندسه ۲	۳۲/۵	۳۴/۱	۴۰/۸	۴۲/۷	۴۸/۵	۵۰/۴	
هندسه ۳	۲۸/۰۷	۲۸/۱۸	۳۲/۷۵	۳۳/۴	۴۵/۵	۴۷	



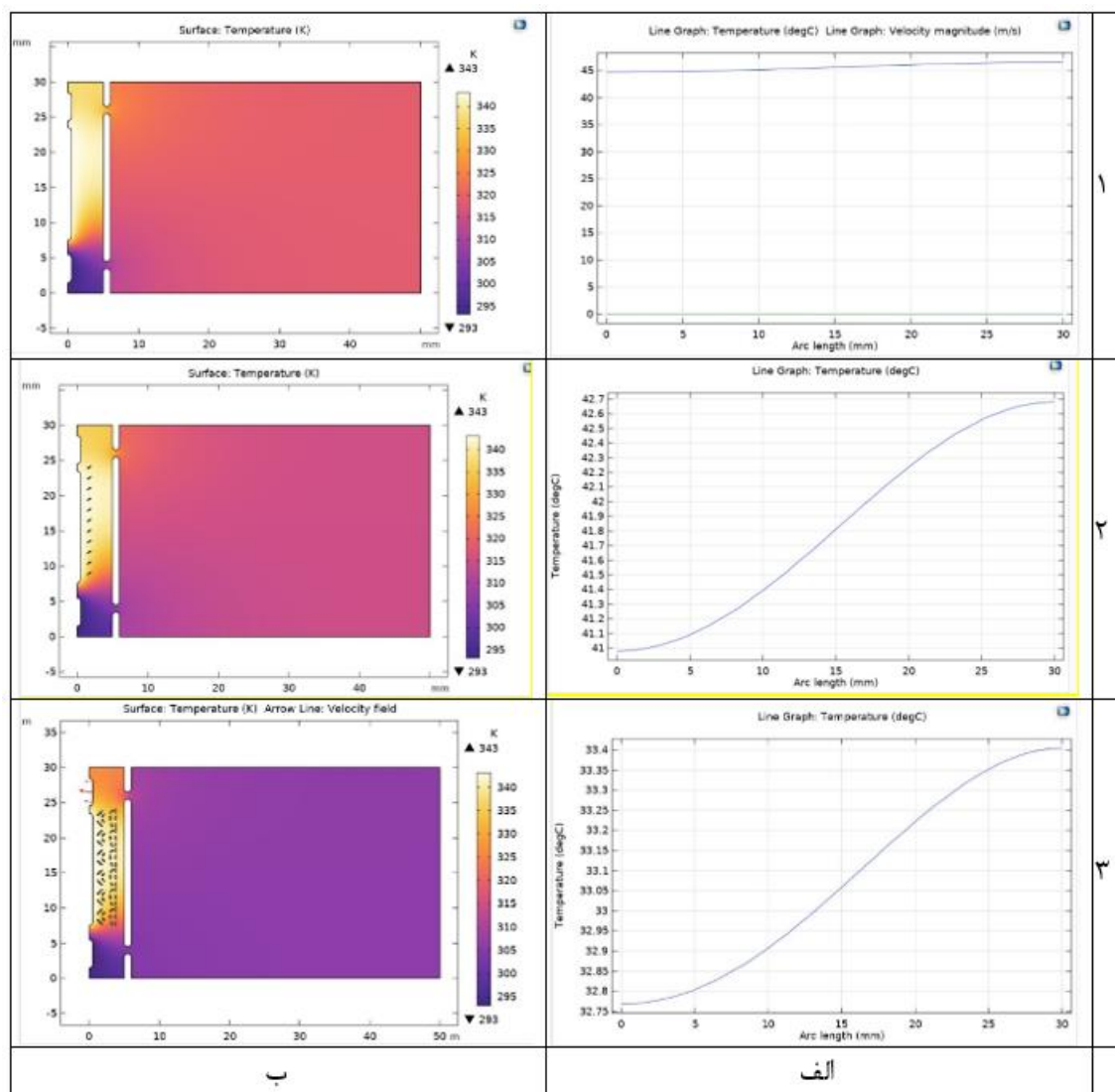
شکل ۱۱- تغییرات دمای سیال هوا درون ساختمان در سرعت ثابت در مقایسه با هندسه متفاوت، الف) ۱ متر بر ثانیه (ب) ۵ متر بر ثانیه (ج) ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۱۲- الف) نمودار دمای سیال هوا درون ساختمان در سرعت ۱ متر بر ثانیه، ب) نحوه توزیع حرارت در ساختمان

دمای هوا به $42/7$ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۳-الف دمای هوای در کف ساختمان $32/75$ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به $33/4$ درجه سانتیگراد می‌رسد. با افزایش سرعت جریان هوا به 5 متر بر ثانیه، اختلاف دما در هندسه ۱ به میزان $8/1$ درصد بود، در هندسه ۲ به میزان $4/4$ درصد و در هندسه ۳ به میزان $1/9$ درصد بود، که نشان دهنده دمای هوای یکنواخت‌تر در درون ساختمان دارد.

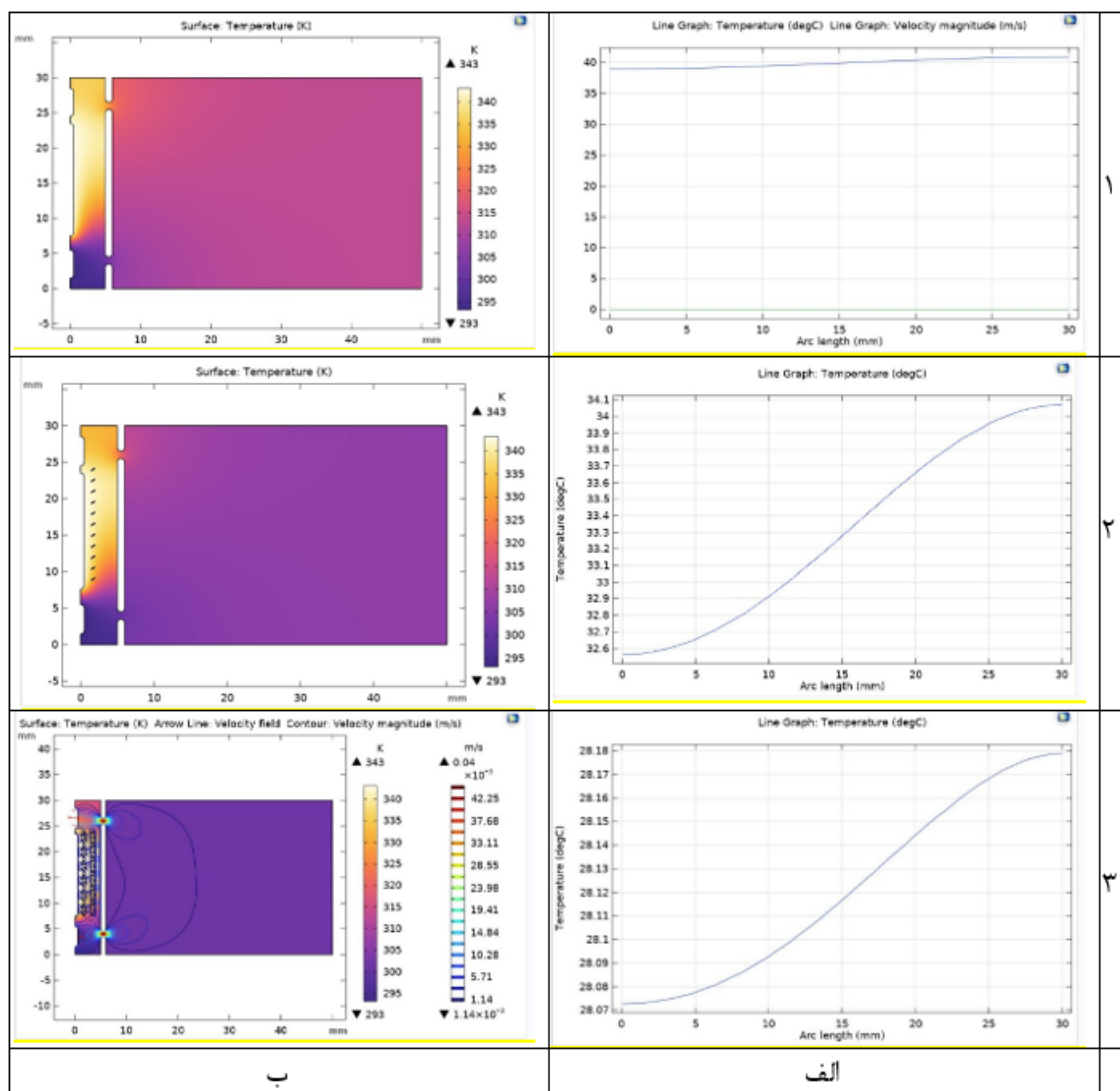
همانطور که در نمودار شکل ۱۳ تغییرات درجه حرارت در درون ساختمان مسکونی از کف تا سقف در سرعت 5 متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف دمای هوای در کف ساختمان 45 درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به 49 درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۲-الف دمای هوای در کف ساختمان $40/8$ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان



شکل ۱۳- الف) نمودار دمای سیال هوا درون ساختمان در سرعت 5 متر بر ثانیه، ب) نحوه توزیع حرارت در ساختمان

سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به $28/18$ درجه سانتیگراد می‌رسد. با افزایش سرعت جریان هوا به 10 متر بر ثانیه، اختلاف دما در هندسه 1 به میزان $7/3$ درصد بود، در هندسه 2 به میزان $4/6$ درصد و در هندسه 3 به $0/4$ درصد بود، که نشان دهنده دمای هوای یکنواخت‌تر در درون ساختمان دارد. با توجه به روند دما در درون ساختمان با سرعت باد ورودی مختلف براساس نتایج بدست آمده با افزایش سرعت اختلاف دما کاهش می‌یابد و در هندسه 3 به کمترین میزان خود می‌رسد.

در نمودار شکل ۱۴ تغییرات درجه حرارت در درون ساختمان مسکونی از کف تا سقف در سرعت 10 متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف دمای هوای در کف ساختمان 38 درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به 41 درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۲-الف دمای هوای در کف ساختمان $32/5$ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت سقف بالا می‌رویم دما افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در بالاترین نقطه ساختمان دمای هوا به $34/1$ درجه سانتیگراد می‌رسد. در نمودار ۳-الف دمای هوای در کف ساختمان $28/07$ درجه سانتیگراد است و هرچه به سمت



شکل ۱۴- الف) نمودار دمای سیال هوا درون ساختمان در سرعت 10 متر بر ثانیه، ب) نحوه توزیع حرارت در ساختمان.

تغییرات فشار سیال

براساس قانون برنولی فشار سیال رابطه عکس با سرعت سیال دارد. با افزایش سرعت سیال فشار هوا درون حفره کاهش می‌ابد. براین اساس رابطه مشابه‌ای میان سرعت جریان سیال هوا درون حفره پاکت ساختمانی دوپوسته و فشار سیال وجود دارد. براین اساس با بررسی نحوه تغییر فشار و سرعت جریان سیال عملکرد حفره با هندسه متفاوت در سرعت‌های ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه در جدول شماره ۴ نشان داده شده است.

براساس شکل ۱۵ در هندسه ۱ گرم شدن جریان هوا در اثر تماس با جداره ی داخلی، سبب افزایش سرعت از ۱ متر بر ثانیه به ۱/۳ متر بر ثانیه می‌شود. سرعت جریان تا رسیدن به خروجی تقریباً ثابت می‌ماند. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 2/85$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 2/98$ پاسکال کاهش می‌یابد. در هندسه ۲ برخورد جریان هوا با هندسه ۲ سبب افت ناگهانی سرعت به ۰/۵ متر بر ثانیه و سپس افزایش آن به ۱/۶ متر بر ثانیه می‌شود. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 6/44$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 2/1$ پاسکال کاهش پیدا می‌کند. در هندسه ۳ سرعت جریان در ابتدا تا ۱/۲ متر بر ثانیه افزایش یافته و سپس به طور متناوب تغییر می‌کند. توزیع سرعت در مقطع حفره غیر یکنواخت است. تغییرات فشار بصورت یکنواخت از ورودی تا خروجی کاهش می‌ابد. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 1/93$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 6/62$ پاسکال کاهش می‌ابد.

در سرعت ۵ متر بر ثانیه براساس شکل ۱۶، در هندسه ۱ گرم شدن جریان هوا در اثر تماس با جداره، سبب افزایش سرعت از ۵ متر بر ثانیه به ۶/۸ متر بر ثانیه می‌شود و سپس سرعت جریان تا رسیدن به خروجی تقریباً ثابت می‌ماند. در نتیجه گرم شدن جریان هوا در محفظه، سبب افزایش سرعت آن می‌شود در حالی که توزیع سرعت در مقطع حفره تقریباً یکنواخت است و افت فشار به طور خطی و یکنواخت رخ می‌دهد. برخورد جریان هوا با هندسه ۲ سبب افت ناگهانی سرعت به ۴/۲ متر بر ثانیه و سپس افزایش آن به ۸/۲ متر بر ثانیه می‌شود. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 1/43$

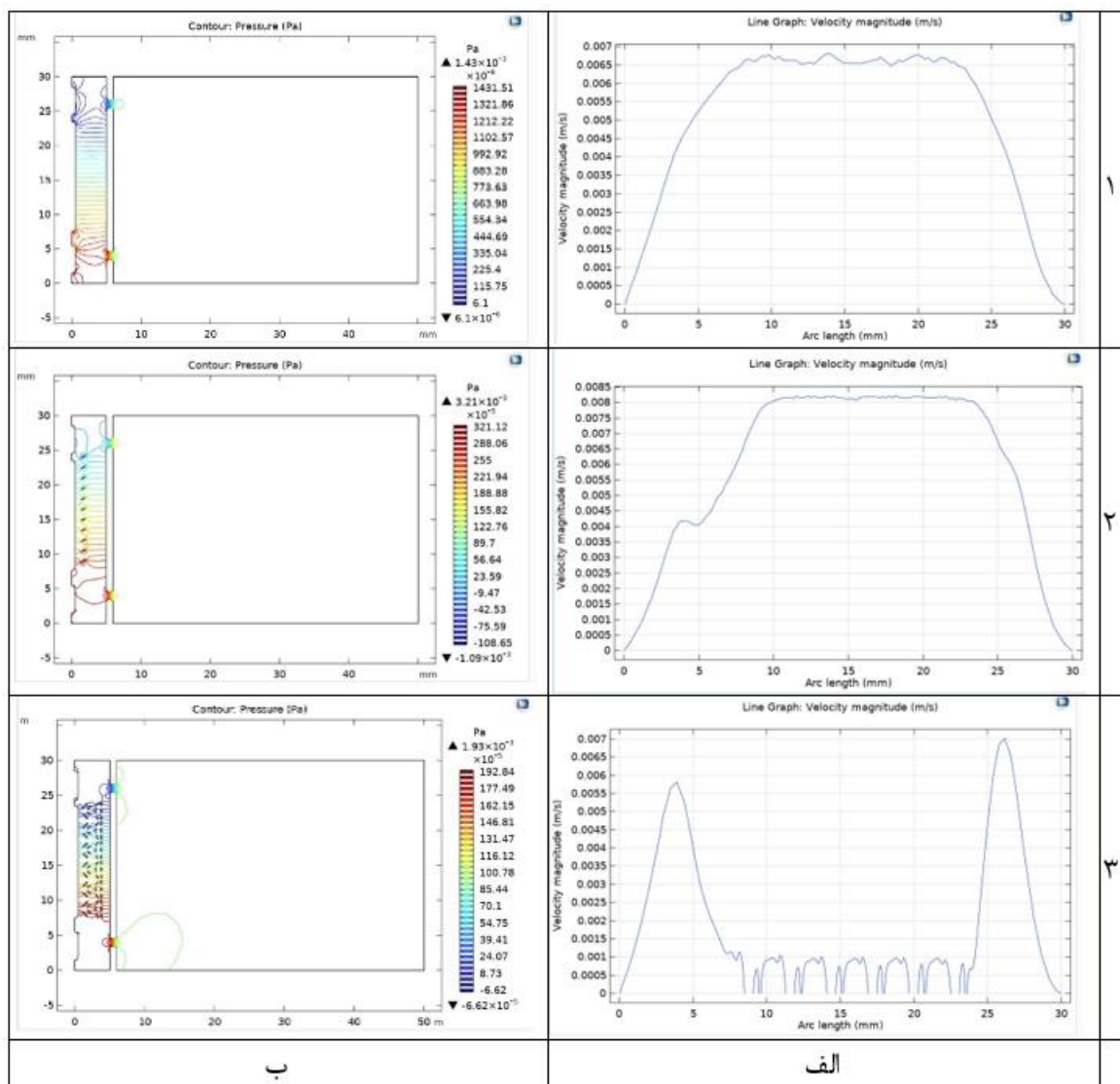
پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 6/1$ پاسکال کاهش پیدا می‌کند. هندسه ۲ سبب افت ناگهانی و سپس افزایش سرعت جریان می‌شود. سرعت جریان در ابتدا تا ۱/۲ متر بر ثانیه افزایش یافته و سپس به طور متناوب تغییر می‌کند. توزیع سرعت در مقطع حفره غیر یکنواخت است. تغییرات فشار بصورت یکنواخت از ورودی تا خروجی کاهش می‌ابد. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 1/93$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 6/62$ پاسکال کاهش می‌ابد. هندسه ۳ سبب تغییرات متناوب سرعت جریان می‌شود. توزیع سرعت در مقطع حفره غیر یکنواخت است و افت فشار به طور خطی و یکنواخت رخ نمی‌دهد.

در شکل ۱۷ در سرعت از ۱۰ متر بر ثانیه هندسه ۱ سبب افزایش سرعت به $13/5$ متر بر ثانیه می‌شود. سرعت جریان تا رسیدن به خروجی تقریباً ثابت می‌ماند. تغییرات فشار بصورت یکنواخت از ورودی تا خروجی کاهش می‌ابد. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 2/89$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 9/07$ پاسکال کاهش پیدا می‌کند. هندسه ۲ برخورد جریان هوا با هندسه ۲ سبب افت ناگهانی سرعت به ۸/۷ متر بر ثانیه و سپس افزایش آن به ۵/۱۶ متر بر ثانیه می‌شود. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 6/4$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 2/26$ پاسکال کاهش می‌یابد. هندسه ۳ سرعت جریان در ابتدا تا ۳/۱۱ متر بر ثانیه افزایش یافته و سپس به طور متناوب تغییر می‌کند. توزیع سرعت در مقطع حفره غیر یکنواخت است. فشار هوا در نقطه ورودی به میزان $10 \times 0/2$ پاسکال است در حالی که در نقطه خروجی به $10 \times 5/89$ پاسکال کاهش می‌ابد.

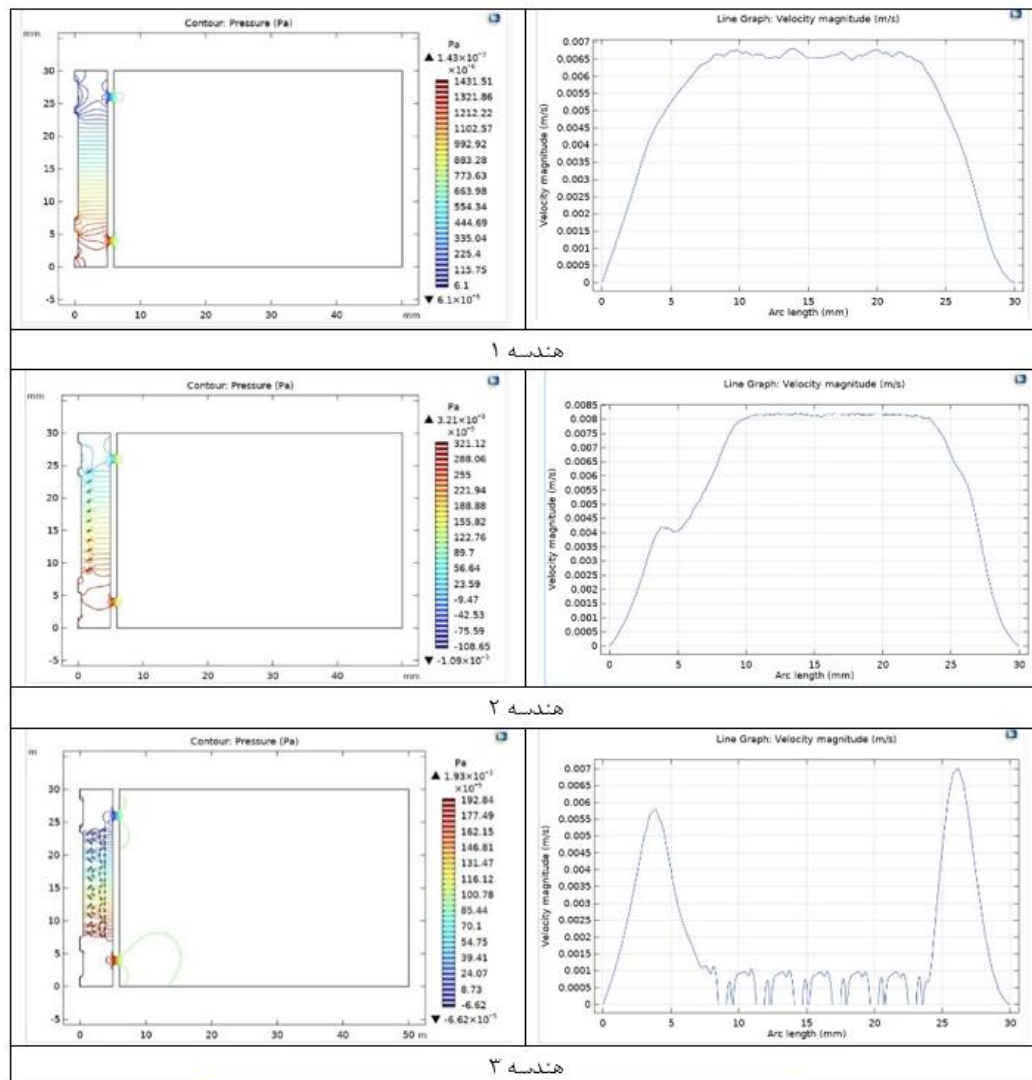
در جدول ۵ مقایسه درصد افت فشار در هندسه‌های متفاوت در سرعت جریان هوا در ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه انجام شده است. با توجه به اینکه براساس معادله برنولی سرعت و فشاری رابطه عکس با یکدیگر دارند هندسه ۱ به دلیل عدم وجود سایبان در درون حفره با کمترین افت فشار ممکن همراه است. در هندسه ۲ با افزایش سرعت افت فشار بصورت قابل توجهی کاهش می‌یابد و این در حالی است که در هندسه ۳ به دلیل پراکندگی غیر یکنواخت سایبان درون حفره بیشترین میزان افت فشار مشاهده شد.

جدول شماره ۴: حداکثر و حداقل فشار هوا در سرعت جریان هوا در ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه

	۱ متر بر ثانیه		۵ متر بر ثانیه		۱۰ متر بر ثانیه	
	حداکثر (Pa)	حداقل (Pa)	حداکثر (Pa)	حداقل (Pa)	حداکثر (Pa)	حداقل (Pa)
هندسه ۱	$2/85 \times 10^{-6}$	$2/98 \times 10^{-6}$	$1/43 \times 10^{-3}$	$6/1 \times 10^{-6}$	$2/89 \times 10^{-3}$	$9/07 \times 10^{-6}$
هندسه ۲	$6/44 \times 10^{-4}$	$2/1 \times 10^{-4}$	$3/21 \times 10^{-3}$	$1/09 \times 10^{-3}$	$6/4 \times 10^{-3}$	$2/26 \times 10^{-3}$
هندسه ۳	$1/93 \times 10^{-3}$	$6/62 \times 10^{-5}$	$1/93 \times 10^{-3}$	$-6/62 \times 10^{-5}$	$5/89 \times 10^{-4}$	$0/02 \times 10^{-3}$



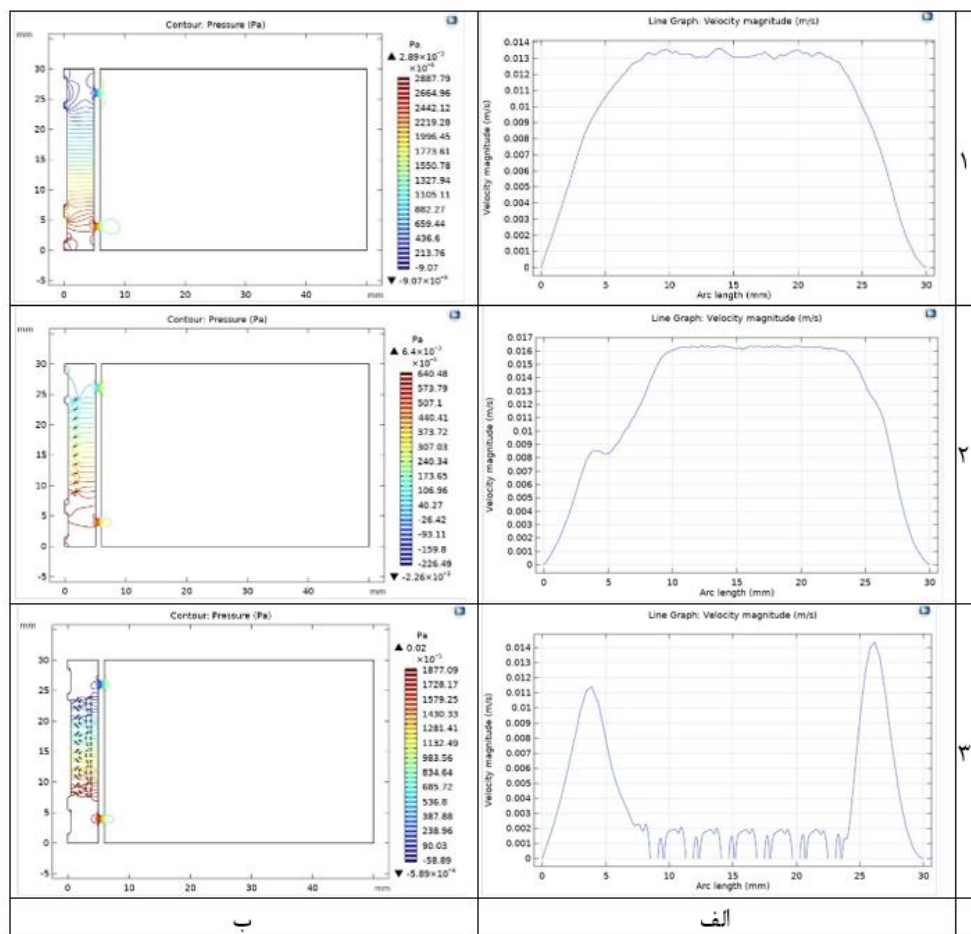
شکل ۱۵- الف) نمودار تغییرات فشار سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱ متر بر ثانیه، ب) نحوه توزیع فشار سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته



شکل ۱۶- نمودار تغییرات فشار سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۵ متر بر ثانیه

نامتقارن و در جهات متفاوت سایبان موجب تقسیم جریان به لایه‌هایی با پروفیل‌های سرعت متفاوت می‌گردد. همانطور که در شکل ۱۸ ج مشاهده می‌شود ۵ پروفیل با سرعت و حجم سیال متفاوت قابل مشاهده است. سه جریان اصلی در قسمت بیرونی سایبان نزدیک به دوپوسته خارجی، یک لایه در میانه و یک لایه با بیشترین سرعت در قسمت پشتی سایبان مشاهده می‌شود. علاوه بر این جریان‌های اصلی خورده جریان‌هایی نیز در میانه سایبان‌ها مشاهده می‌شود. وجود پروفیل‌های سرعت مختلف سبب تبدیل جریان آرام ورودی به آشفته، بیشترین میزان انتقال حرارت همرفتی به دلیل حداکثر استفاده از سطح سایبان در مقابل جریان هوا و از طرف دیگر افت فشار بسیار زیاد در هندسه ۳ می‌گردد.

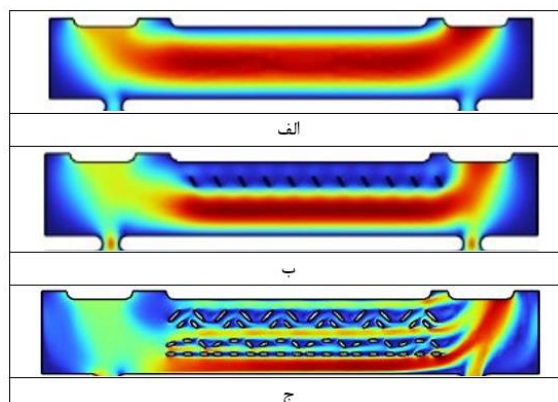
شکل ۱۸ نحوه عبور جریان سیال از درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سه هندسه نشان داده شده است. همانطور که در هندسه ۱ مشاهده می‌شود جریان سیال بصورت یکنواخت در کل کانال توسعه یافته است. بیشترین سرعت جریان سیال در میانه و کمترین سرعت در دو سمت دیوارهای داخلی مشاهده می‌شود. این ویژگی سبب حداقل تماس سیال هوا با دیواره‌ها می‌شود. در هندسه ۲ وجود سایبان مورب موجب تغییر مسیر جریان و برخورد سیال هوا با سایبان در لبه داخلی شده و کمترین میزان سیال از فضای میان سایبان و نمای جلو عبور می‌کند. سایبان از جنس آلومینیوم با جذب بیشتر گرما نسبت به شیشه به شناوری و بهتر سیال هوا در درون حفره نمای دوپوسته کمک می‌کنند. در هندسه شماره ۳ چیدمان



شکل ۱۷- الف) نمودار تغییرات فشار سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، ب) نحوه توزیع فشار سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته

جدول ۵: افت فشار در هندسه های متفاوت در سرعت جریان هوا در ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه

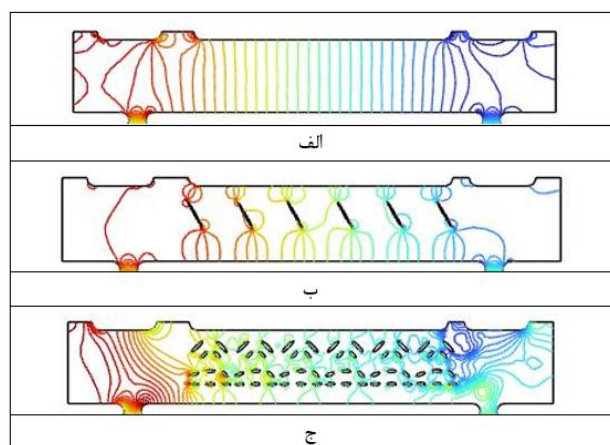
هندسه	۱ متر بر ثانیه	۵ متر بر ثانیه	۱۰ متر بر ثانیه	تفاوت افت فشار
هندسه ۱	—	—	—	—
هندسه ۲	۵۰٪	۴۸٪	۱۸٪	۶۴٪
هندسه ۳	۸۳٪	۸۱٪	۸۰٪	۳٪



شکل ۱۸- نحوه عبور هوا در درون پاکت نمای دوپوسته با هندسه متفاوت، الف) هندسه ۱ ب) هندسه ۲ ج) هندسه ۳

ورودی و کمترین سرعت در قسمت خروجی مشاهده می‌شود. که نشان دهنده افت فشار در درون پاکت ساختمانی دو دوپوسته. در هندسه ۲ وجود سایبان مورب موجب تغییر فشار سیال هوا در ناحیه اطراف سایبان در لبه داخلی می‌شود و این درحالی است که فشار سیال در پشت سایبان مورب بصورت یکنواخت توسعه پیدا می‌کند.

وجود سایبان با قابلیت‌رسانای حرارتی بر تغییرات فشار در درون پاکت مؤثر است. در هندسه شماره ۳ چیدمان نامتقارن و در جهات متفاوت سایبان موجب افت شدید فشار با پروفیل‌های متفاوت می‌گردد. همانطور که در شکل ۲۰ ج مشاهده می‌شود، پروفیل فشار در اطراف هندسه ۳ دچار تغییرات می‌گردد به موجب کاهش و افت شدید فشار در قسمت خروجی می‌شود. در هندسه ۳ بر خلاف هندسه ۱ پروفیل فشار از یکنواخت به آشفته تبدیل می‌شود و از یک جریان همگن به بخش‌هایی با فشار متفاوت در قسمت بیرونی سایبان نزدیک به دوپوسته خارجی، یک لایه در میانه و یک لایه با کمترین فشار در قسمت پشتی سایبان مشاهده می‌شود. علاوه بر این افت فشار اصلی تغییراتی نیز در میانه سایبان‌ها مشاهده می‌شود. وجود پروفیل‌های فشار مختلف سبب افت فشار بیشتر در هندسه ۳ و نیاز و مصرف انرژی بیشتر جهت تأمین افت فشار می‌گردد.



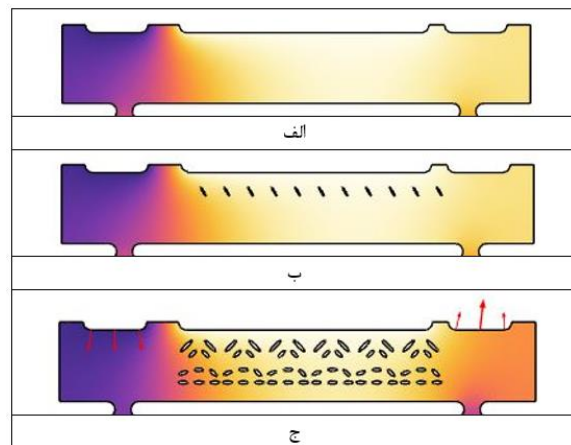
شکل ۲۰- پروفیل تغییرات فشار سیال هوا در درون پاکت نمای

دوپوسته با هندسه متفاوت، الف) هندسه ۱ ب) هندسه ۲ ج) هندسه

تغییرات سرعت و دمای سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته

براساس مشاهدات آزمون انتقال حرارت در هسته ساندویچ پنل و تأثیر سرعت سیال و تغییرات درجه حرارت، حفره در

همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود دمای سیال بصورت غیر یکنواخت در کل کانال توسعه یافته است. بیشترین دمای سیال در قسمت خروجی و کمترین دما در قسمت ورودی پاکت نمای دوپوسته مشاهده می‌شود. خطوط دمای سیال در درون پاکت نمای دوپوسته مشاهده می‌شود. در میانه و قسمت جلویی پاکت نمای دوپوسته وجود سایبان موجب افزایش دمای جریان در هنگام برخورد سیال هوا با سایبان در لبه داخلی می‌شود. سایبان‌های از جنس آلومینیوم با جذب و انتقال گرما به دلیل رسانایی حرارتی به افزایش دمای سیال هوا در درون حفره نمای دوپوسته کمک می‌کنند. سه پروفیل دمایی اصلی در قسمت بیرونی سایبان نزدیک به دوپوسته خارجی، یک لایه در میانه و یک لایه با بیشترین دما در قسمت بیرونی سایبان مشاهده می‌شود. علاوه بر این پروفیل دمایی دیگر نیز در میانه سایبان‌ها مشاهده می‌شود. وجود پروفیل‌های دمایی مختلف سبب توزیع بهتر حرارت و تبدیل جریان آرام ورودی به آشفته می‌گردد. هندسه ۳ با چیدمان نامتقارن و در جهات متفاوت سایبان موجب توزیع حرارت بیشتر به جریان سیال در لایه‌هایی با پروفیل‌های سرعت متفاوت می‌گردد. در سرعت ۵ متر بر ثانیه توزیع و انتقال حرارت که موجب بهبود جریان همرفتی می‌گردد عملکرد بهتری را از خود نشان داد.



شکل ۱۹- نحوه توزیع دما در درون پاکت نمای دوپوسته با هندسه

متفاوت، الف) هندسه ۱ ب) هندسه ۲ ج) هندسه ۳

شکل ۲۰ نحوه تغییرات فشار سیال از درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سه هندسه نشان داده شده است. همانطور که در هندسه ۱ مشاهده می‌شود فشار سیال بصورت یکنواخت در کل کانال توسعه یافته است. بیشترین فشار سیال در قسمت

۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۸ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۳-الف و ۳-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱/۲ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۸ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. اختلاف دما در هندسه ۱، ۲ و ۳ با سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۶/۸، ۸/۲ و ۱/۲ متر بر ثانیه و اختلاف دما ۶۶/۱ بود.

در نمودار شکل ۲۴ تغییرات سرعت و درجه حرارت در درون حفره در پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف و ۱-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱۳/۵ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۷/۵ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۲-الف و ۲-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱۶/۵ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۷/۵ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۳-الف و ۳-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱۱/۳ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۷/۵ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. اختلاف دما در هندسه ۱، ۲ و ۳ با سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱۳/۵، ۱۶/۵ و ۱۱/۳ متر بر ثانیه و اختلاف دما ۶۶/۹ بود. این بدان معنی است که با افزایش سرعت در درون حفره در پاکت ساختمانی دوپوسته به میزان ۱، ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، درجه حرارت حرارت در درون حفره تغییر معنا داری ندارد.

نتایج نشان می‌دهد که هندسه حفره نقش بسیار مهمی در نحوه انتقال حرارت و توزیع دما در داخل ساختمان دارد. در میانه حفره در همه سه حالت شبیه‌سازی، دمای هوا در میانه حفره به طور قابل توجهی نسبت به دمای هوای ورودی

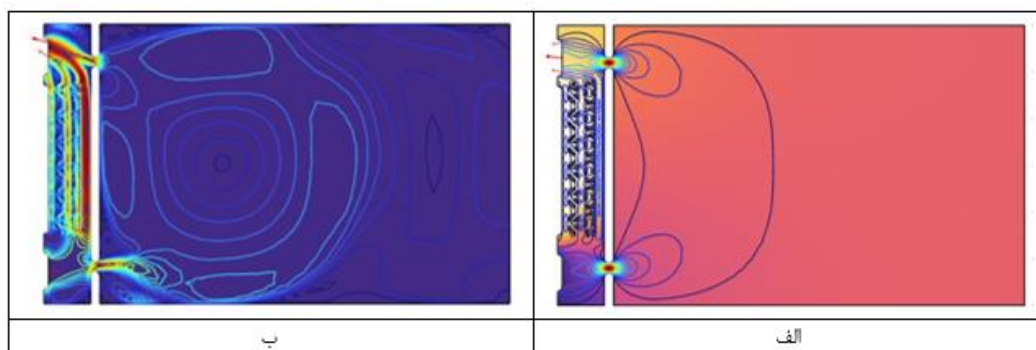
پاکت ساختمانی دوپوسته نقش اساسی در تغییرات سرعت و درجه حرارت ساختمان بازی می‌کند. براساس شبیه‌سازی انجام شده تغییرات سرعت و دما در درون حفره که تأثیر آن بر دمای ساختمان که شکل ۲۱ نشان داده شد مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی در سه سرعت مختلف سیال هوا در درون حفره پاکت ساختمانی مقادیر دمای درون ساختمان متغیر بود که نشان از تأثیر هندسه بر انتقال حرارت را دارد.

در نمودار شکل ۲۲ تغییرات سرعت و درجه حرارت در درون حفره در پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف و ۱-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱/۳ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۹ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۲-الف و ۲-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱/۶ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۹ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۳-الف و ۳-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱/۲ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۹ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. اختلاف دما در هندسه ۱، ۲ و ۳ با سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۲ متر بر ثانیه و اختلاف دما ۶۶/۶ بود.

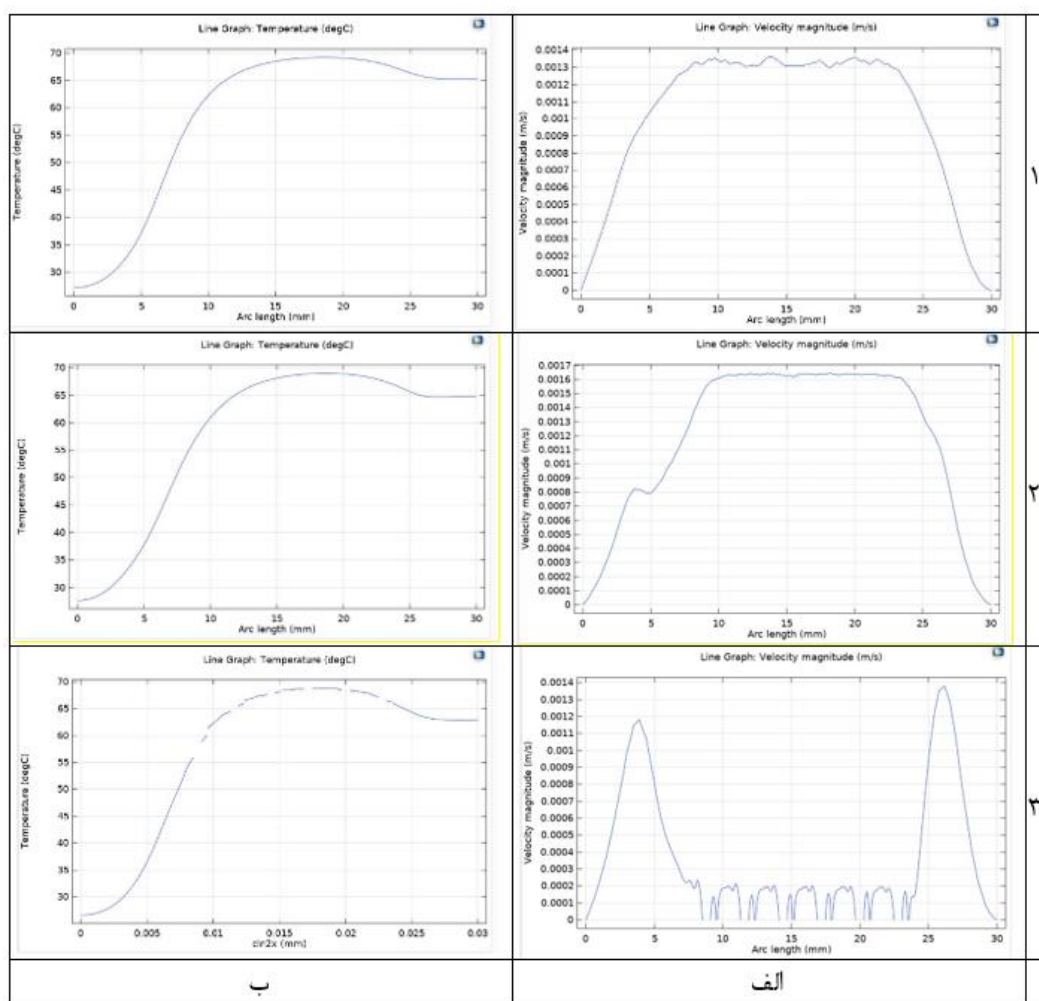
در نمودار شکل ۲۳ تغییرات سرعت و درجه حرارت در درون حفره در پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در نمودار ۱-الف و ۱-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۶/۸ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی ۲۳ درجه سانتیگراد بود دما در میانه حفره تا ۶۸ درجه سانتیگراد افزایش یافت. نمودار دمای هوای درون حفره بصورت نمایی افزایش پیدا کرد. در نمودار ۲-الف و ۲-ب سرعت جریان هوا در درون حفره حداکثر ۸/۲ متر بر ثانیه است و این درحالی است که دمای هوای ورودی

بهبود عملکرد افزایش انتقال حرارت از داخل ساختمان به نمای دوپوسته و به بیرون می‌گردد.

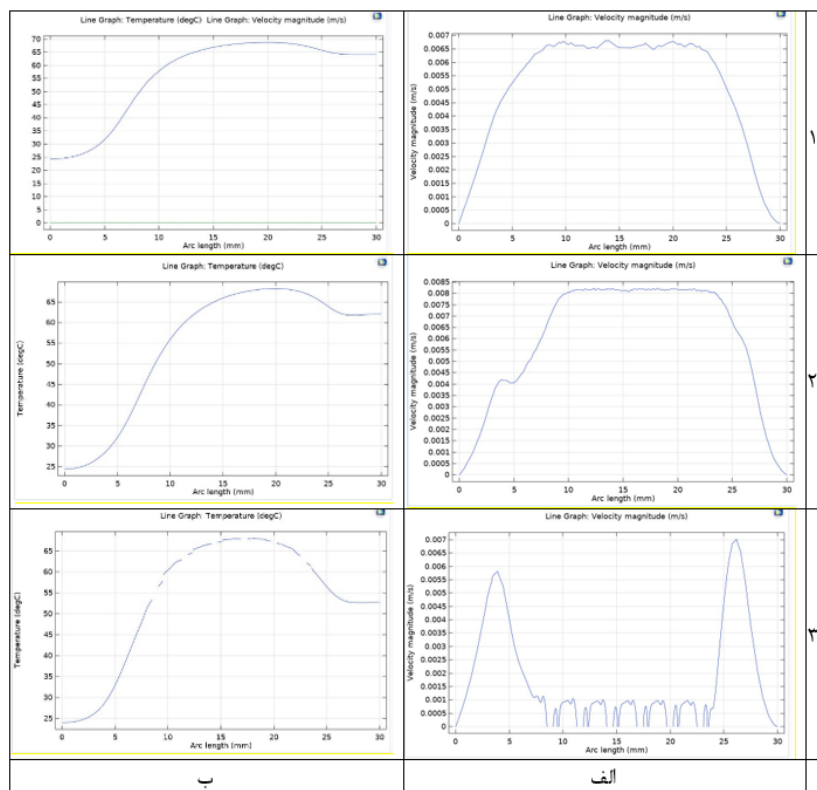
افزایش یافته است. افزایش دما در داخل حفره به صورت نمایی بوده است. این نشان می‌دهد که مکانیسم انتقال حرارت در این ناحیه عمدتاً به صورت همرفت طبیعی است که موجب



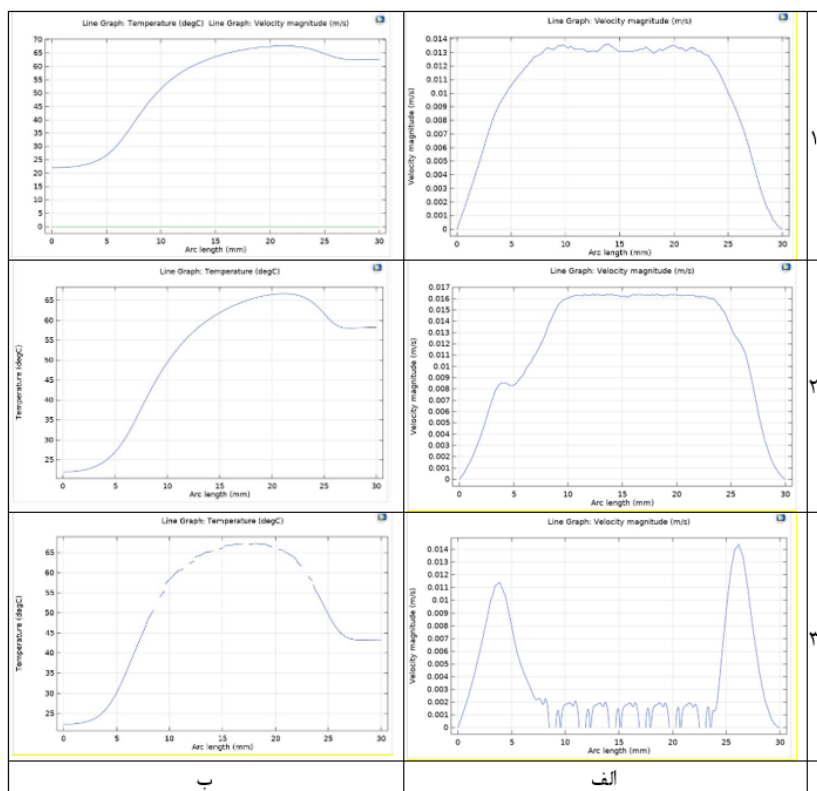
شکل ۲۱- جریان سیال هوا در درون پاکت نمای دوپوسته و ساختمان در هندسه ۳، الف) خطوط جریان سیال هوا ۱ ب) لایه بندی سرعت جریان سیال هوا



شکل ۲۲- الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱ متر بر ثانیه، ب) تغییرات دمای هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته



شکل ۲۳- الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۵ متر بر ثانیه، ب) تغییرات دمای هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته



شکل ۲۴- الف) نمودار سرعت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، ب) نحوه حرکت جریان سیال هوا درون پاکت ساختمانی دوپوسته

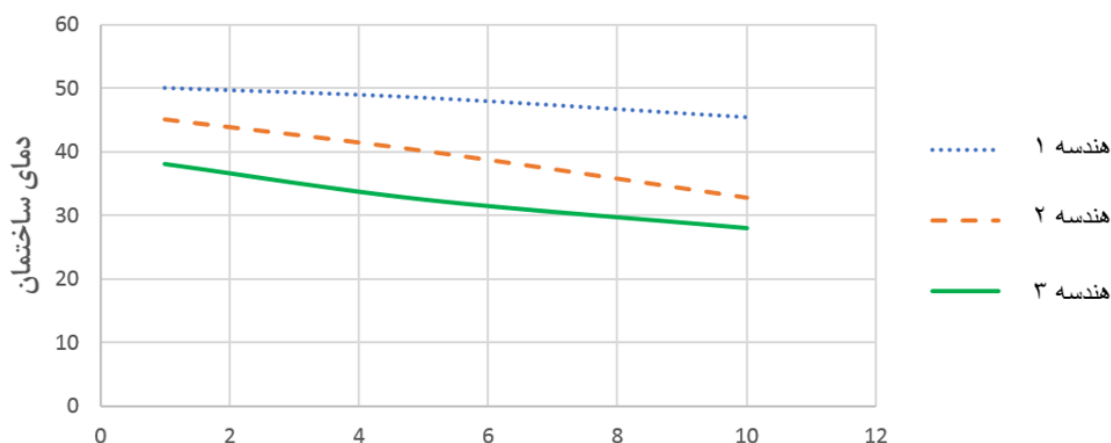
نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیر هندسه سایبان بر عملکرد حرارتی نمای دوپوسته در یک واحد مسکونی در شهر سمنان پرداخته است. شبیه‌سازی عددی برای سه نوع هندسه سایبان متفاوت انجام شد تا جریان هوا، دما و فشار در نمای جنوبی دوپوسته و اتاق مجاور آن در ماه مرداد مورد ارزیابی قرار گیرد. هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به درک عمیق‌تری از رفتار حرارتی سایبان‌ها با هندسه‌های مختلف در مقایسه با سایبان‌های معمول در نماهای دوپوسته بود. نتایج این مطالعه نشان داد که شکل و چیدمان سایبان‌ها در ساختمان‌های با نمای دوپوسته، تأثیر قابل توجهی بر الگوی جریان هوا و کاهش دمای داخلی ساختمان دارد. در این پژوهش، سه هندسه مختلف مورد بررسی قرار گرفت: هندسه ۱ شامل حفره نمای دوپوسته بدون سایبان، هندسه ۲ با سایبان‌های مورب ۴۵ درجه در درون حفره، و هندسه ۳ با استفاده از سایبان‌های نامنظم در جهات مختلف بود. تأثیر سرعت جریان باد در درون نمای دوپوسته بر رفتار، دما و فشار سیال در هر یک از این هندسه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت.

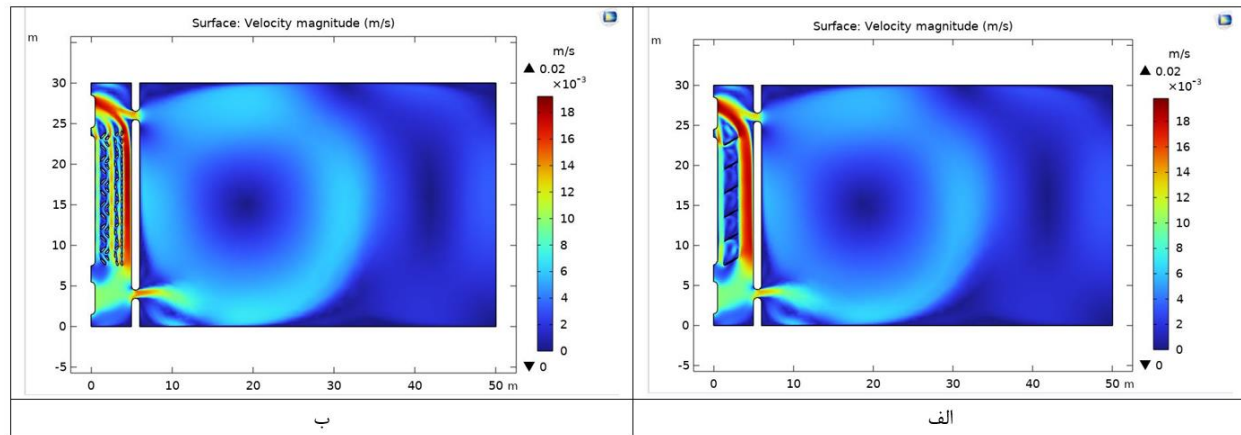
براساس نتایج بدست آمده در سرعت ۱ متر بر ثانیه حفره با سایبان هندسه ۲ به میزان ۴ درصد حفره نسبت هندسه ۱ و حفره با هندسه ۳، ۶/۶ درصد نسبت به حفره با سایبان هندسه ۲ دما داخل ساختمان را کاهش داد. در سرعت ۵ متر بر ثانیه سایبان هندسه ۲ به مقدار ۱۲/۵ درصد نسبت هندسه ۱ و

حفره با هندسه ۳، ۲۵ درصد نسبت به حفره با هندسه ۲ دما داخل ساختمان را کاهش داد. در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه هندسه ۲ به ۱۱/۷ درصد نسبت به حفره با سایبان هندسه ۱ و هندسه ۳، ۲۱/۴ درصد نسبت به حفره با سایبان هندسه ۲ دما داخل ساختمان را کاهش داد. بنابراین براساس نتایج بدست آمده همانطور که در شکل ۲۵ نشان داده شده، بهینه‌ترین عملکرد در سرعت جریان سیال هوا با سرعت متوسط ۵ متر بر ثانیه دیده شد که هندسه ۳ در درون حفره پاکت ساختمانی دوپوسته نسبت به هندسه ۱، ۳۷/۵ درصد و نسبت به حفره با سایبان هندسه ۲ به میزان ۲۵ درصد دمای داخل ساختمان را کاهش داد.

مشاهدات حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول نشان داد که جریان هوا نقش مهمی در کاهش دما ایفا می‌کند. در شرایطی که هوا به صورت آرام حرکت می‌کند، انتقال حرارت کمتری رخ می‌داد و دمای بیشتری در داخل ساختمان باقی می‌ماند. با افزایش سرعت جریان هوا درون حفره نمای دوپوسته، جریان هوا از شکل آرام به آشفتگی تبدیل شد. جریان‌های آشفتگی به دلیل برخورد بیشتر هوا با سطوح سایبان، باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای داخل ساختمان می‌شدند. در هندسه ۱، جریان هوا به صورت یکنواخت در فضای خالی بین دو پوسته حرکت می‌کرد و جریان آشفتگی ورودی سریعاً به جریان آرام تبدیل می‌شد. با حرکت هوا به سمت بالا، فشار به صورت یکنواخت و همگن در درون حفره کاهش می‌یافت.



شکل ۲۵- تغییر دمای داخل ساختمان نسبت به تغییر سرعت جریان هوا در پاکت دوپوسته.



شکل ۲۶- نمودار نحوه تبادل جریان سیال هوا از درون حفره پاکت ساختمانی به درون ساختمان دوپوسته، الف) هندسه ۲ ب) هندسه ۳

این پژوهش نشان می‌دهد که هندسه سایبان‌های به کار رفته در ساختمان‌های دوپوسته تأثیر قابل توجهی بر حرکت هوا و کاهش دمای داخلی ساختمان دارد. شکل‌های مختلف سایبان‌ها در فضای میان دو پوسته، جریان هوا را به صورت‌های متفاوتی هدایت می‌کنند. سایبان‌های نامنظم سبب ایجاد جریان‌های هوای آشفته شده و انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. استفاده از جنس آلومینیوم برای سایبان‌ها نیز به بهبود جذب و انتقال حرارت کمک می‌کند. این جریان هوای گرم‌شده به وسیله سایبان‌ها در فضای خالی میان دو پوسته، از حالت آرام به جریان آشفته تبدیل شده و انتقال حرارت به شکل مؤثرتر همرفتی انجام می‌گیرد. در نتیجه، دمای داخلی ساختمان به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. از نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که:

• تأثیر هندسه بر توزیع دما :

- هندسه‌های مختلف حفره‌ها، توزیع دمای داخل ساختمان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند.
- هندسه ۳ با ایجاد کمترین اختلاف دما، منجر به توزیع یکنواخت‌تر دما و افزایش آسایش حرارتی ساکنین می‌شود.

• تأثیر هندسه بر سرعت جریان هوا :

- هندسه حفره‌ها بر سرعت جریان هوا در داخل حفره‌ها نیز تأثیرگذار است.
- هندسه ۲ با ایجاد بیشترین سرعت جریان هوا، در حالی که هندسه ۳ کمترین سرعت را نشان می‌دهد.

همانگونه که در شکل ۲۶ نشان داده شده، در هندسه ۲ سایبان مورب باعث تغییر مسیر جریان هوا می‌شد. هوا با برخورد به سایبان، گرمای بیشتری را جذب می‌کرد که این امر سبب ایجاد آشفته‌گی در اطراف سایبان شده و سرعت، فشار و دمای هوا را درون حفره را تغییر می‌داد. در هندسه ۳ با سایبان‌های نامنظم، پیچیده‌ترین الگوی جریان را ایجاد می‌کرد. این سایبان‌ها باعث ایجاد جریان‌های هوای آشفته و پیچیده می‌شدند که هوا را در تماس بهتر با سطوح سایبان قرار می‌داد و انتقال حرارت همرفتی از درون نمای دوپوسته را افزایش می‌داد.

سایبان‌های نامنظم با ایجاد جریان‌های آشفته، باعث کاهش قابل توجه دمای داخل ساختمان می‌شدند. این جریان‌های آشفته، حرارت را به طور مؤثرتری از سطوح سایبان به هوا منتقل می‌کردند. با این حال، این نوع سایبان‌ها افت فشار بیشتری در سیستم تهویه ایجاد می‌کردند که باید در طراحی سیستم‌های تهویه مد نظر قرار گیرد. در نهایت، این مطالعه نشان داد که با طراحی هوشمندانه سایبان‌های نامنظم و ایجاد جریان‌های هوای پیچیده، و در نتیجه بهبود انتقال حرارت به شکل همرفتی رسید که این موضوع منجر به به کاهش دمای داخلی ساختمان‌هایی با مصرف انرژی کمتر می‌شود. این کاهش مصرف انرژی به دلیل جلوگیری از انباشت جرم حرارتی در نمای ساختمان است. این روش به ویژه برای ساختمان‌های با نمای دوپوسته که دارای فضای خالی بین دو جداره هستند، بسیار مؤثر است و می‌تواند راهکاری نوآورانه برای بهبود عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها باشد.

- **تأثیر سرعت باد بر رفتار جریان هوا :**
 - با افزایش سرعت باد، رفتار جریان هوا پیچیده‌تر می‌شود و در برخی هندسه‌ها مانند هندسه ۳ به حالت آشفته تبدیل می‌شود.
 - **تأثیر هندسه بر انتقال حرارت :**
 - هندسه ۳ با ایجاد جریان همرفتی قوی‌تر، منجر به افزایش انتقال حرارت از داخل ساختمان به نمای دوپوسته و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان می‌شود.
 - افزایش عدد رینولدز (با افزایش سرعت جریان) منجر به افزایش انتقال حرارت و بهبود عملکرد سیستم می‌شود.
 - **نتایج کلی و پیشنهادات:**
 - **اهمیت انتخاب هندسه مناسب :**
 - انتخاب هندسه مناسب برای حفره‌ها، علاوه بر تأثیر بر زیبایی ساختمان، به شدت بر عملکرد حرارتی آن نیز مؤثر است.
 - هندسه‌ای که منجر به ایجاد جریان همرفتی قوی و توزیع یکنواخت دما شود، برای بهبود عملکرد حرارتی ساختمان مناسب‌تر است.
 - **تأثیر هندسه بر آسایش حرارتی :**
 - با انتخاب هندسه مناسب، می‌توان به کاهش اختلاف دما در داخل ساختمان و افزایش آسایش حرارتی ساکنین دست یافت.
 - **کاهش مصرف انرژی :**
 - بهبود انتقال حرارت و توزیع یکنواخت دما، منجر به کاهش مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمان می‌شود.
 - **طراحی سیستم‌های دودکش کارآمد :**
 - در نظر گرفتن رفتار جریان هوا در حفره‌ها، به طراحی سیستم‌های دودکش کارآمدتر برای نماهای دوپوسته کمک می‌کند.
 - **بهبود عملکرد عایق حرارتی :**
 - بکارگیری هندسه مناسب سایبان در درون حفره نمای دوپوسته می‌تواند به بهبود عملکرد عایق حرارتی ساختمان کمک کند.
- توصیه‌ها برای تحقیقات آینده:**
- **بررسی تأثیر مواد مختلف :** بررسی تأثیر استفاده از مواد مختلف در ساخت حفره‌ها بر روی عملکرد حرارتی سیستم.
 - **بررسی هندسه‌های پیچیده‌تر :** بررسی هندسه‌های پیچیده‌تر و ترکیبی برای دستیابی به عملکرد بهینه.
 - **شبیه‌سازی در شرایط آب و هوایی مختلف :** شبیه‌سازی سیستم در شرایط آب و هوایی مختلف برای ارزیابی عملکرد آن در شرایط واقعی.
 - **بهینه‌سازی هندسه با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی :** استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای یافتن بهترین هندسه حفره‌ها.
 - **نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هندسه سایبان در درون حفره یک پارامتر کلیدی در طراحی نماهای دوپوسته است و انتخاب مناسب آن می‌تواند به بهبود عملکرد حرارتی ساختمان، کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش حرارتی ساکنین کمک کند. با در نظر گرفتن نتایج این تحقیق و انجام مطالعات بیشتر، می‌توان به طراحی نماهای دوپوسته با عملکرد بهینه دست یافت.**

تشکر و قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان و پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران که در تکمیل روند تحقیقات تجربی و شبیه‌سازی های عددی کمک نمودند، تشکر و قدردانی میشود. این مقاله برگرفته از رساله دکتری مصطفی حسینی واجاری است که به راهنمایی دکتر حسین مرادی نسب و مرتضی بهزاد نسب در دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان در دست انجام است.

References

- 1- Röck M, Saade MR, Balouktsi M, Rasmussen FN, Birgisdottir H, Frischknecht R, Habert G, Lützkendorf T, Passer A. Embodied GHG emissions of buildings–The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy: Peer-reviewed journal It is published by Elsevier*. 2020 Jan 15;258:114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- 2- Gonçalves M, Figueiredo A, Almeida RM, Vicente R. Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews: A Comprehensive Overview It is published by Elsevier*. 2024 Jul 1;199:114474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474>
- 3- Halawa E, Ghaffarianhoseini A, Ghaffarianhoseini A, Trombley J, Hassan N, Baig M, Yusoff SY, Ismail MA. A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin. *Renewable and Sustainable Energy Reviews: Peer-reviewed journal it is published by Elsevier*. 2018 Feb 1;82:2147-61. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.061>
- 4- Souayfane F, Biwole PH, Fardoun F. Thermal behavior of a translucent superinsulated latent heat energy storage wall in summertime. *Applied Energy: Peer-reviewed journal It is published by Elsevier*. 2018 May 1;217:390-408. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.119>
- 5- Zhang T, Yang H. Flow and heat transfer characteristics of natural convection in vertical air channels of double-skin solar façades. *Applied Energy: Peer-reviewed journal It is published by Elsevier*. 2019 May 15;242:107-20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.072>
- 6- Lim Y, Ismail MR. Aptitudes of double skin façade toward green building within built environment. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences: It is published by SEMARAK ILMU PUBLISHING*. 2022 Nov 12;100(3):146-70.
- 7- Pelletier K, Wood C, Calautit J, Wu Y. The viability of double-skin façade systems in the 21st century: A systematic review and meta-analysis of the nexus of factors affecting ventilation and thermal performance, and building integration. *Building and Environment: A Leading Journal in the Field it is published by Elsevier*. 2023 Jan 15;228:109870.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109870>

8- Op't Veld P. Introduction to EC RESHYVENT-EU cluster project on demand controlled hybrid ventilation for residential buildings. *Building and Environment: A Leading Journal in the Field* it is published by Elsevier. 2008 Aug 1;43(8):1342-9.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.043>

9- Kariminia S, Rezaie M, Farokhi M, Shooshtarian S, Shamshirband S, Mosavi A. Impact of double skin façade constructional features on heat transfer and natural ventilation of high-rise residential buildings. Available at SSRN - Elsevier 4054206. 2022 Mar 10.

<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4054206>

10- Zanelli A, Mazzola C. Towards the Smart Filter. In *Lightweight Energy: Membrane Architecture Exploiting Natural Renewable Resources* 2022 Dec 1 (pp. 1-32). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08154-5_1

11- Xamán J, Álvarez G, Lira L, Estrada C. Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of facade elements *Energy and Buildings: A Leading Journal in the Field* it is published by Elsevier. 2005 Jul 1;37(7):787-94.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.001>

12- Al Dakheel J, Tabet Aoul K. Building Applications, opportunities and challenges of active shading systems: A state-of-the-art review. *Energies: A Comprehensive Journal on Energy Research* it is published by MDPI. 2017 Oct 23;10(10):1672.

<https://doi.org/10.3390/en10101672>

13- Palmero-Marrero AI, Oliveira AC. Evaluation of a solar thermal system using building louvre shading devices. *International Solar Energy Society (ISES): Solar Energy* is the official journal of ISES. 2006 May 1;80(5):545-54.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.04.003>

14- Javanroodi K, Mahdavejad M, Nik VM. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy: Peer-reviewed journal* it is published by Elsevier. 2018 Dec 1;231:714-46.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.116>

15- Preet S, Mathur J, Mathur S. Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behavior: A comprehensive review. *International Solar Energy Society (ISES): Solar Energy* is the official journal of ISES. 2022 Apr 1;236:249-79.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.055>

16- Li Y, Darkwa J, Kokogiannakis G, Su W. Phase change material blind system for double skin façade integration: System development and thermal performance evaluation. *Applied Energy: Peer-reviewed journal* It is published by Elsevier. 2019 Oct 15;252:113376.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113376>

17- Jankovic A, Goia F. Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behaviour. *Building and Environment: A Leading Journal in the Field* it is published by Elsevier. 2021 Jun 1;196:107796.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107796>

18- Hong X, Lin J, Yang X, Wang S, Shi F. Comparative analysis of the daylight and building-energy performance of a double-skin facade system with multisectional shading devices of different control strategies. *Journal of Energy Engineering: A Leading Publication in the Field* it is published by the American Society of Civil Engineers (ASCE). 2022 Jun 1;148(3):05022001.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000828)

19- Wang M, Hou J, Hu Z, He W, Yu H. Optimisation of the double skin facade in hot and humid climates through altering the design parameter combinations. *International Journal of Sustainable Built Environment: A Powerful Tool for Sustainable Design*. 2021 Jun (Vol. 14, pp. 511-521). Tsinghua University Press. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0682-6>

20- Mohammed KI, Alibaba HZ. Solar Control and Shading Strategies for Double Skin Facade in Hot Climate. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*. 2018;4(1):205-15. <https://www.researchgate.net/publication/322500377>

21- Aruta G, Ascione F, Bianco N, Iovane T, Mauro GM. A responsive double-skin façade for the retrofit of existing buildings: Analysis on an office building

in a Mediterranean climate. *Energy and Buildings* is a semi-monthly peer-reviewed scientific journal it is published by Elsevier. 2023 Apr 1;284:112850.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112850>

22- Elghazi YS, Hamza N, Dade-Robertson M. Modelling and simulation of integrated responsive solar-shading with double skin facades in hot arid climates. *Proceedings of BSO 2018: 4th Building Simulation and Optimization Conference*, Cambridge, UK: 11-12 September 2018.

https://www.researchgate.net/publication/327681754_Modelling_and_Simulation_of_Integrated_Responsive_Solar-Shading_with_Double_Skin_Facades_in_Hot_Arid_Climates

23- Preet S, Mathur J, Mathur S. Influence of geometric design parameters of double skin façade on its thermal and fluid dynamics behavior: A comprehensive review. *International Solar Energy Society (ISES): Solar Energy* is the official journal of ISES. 2022 Apr 1;236:249-79.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.055>

24- Sarbu I, Sarbu I. Thermal energy storage. *Advances in Building Services Engineering: Studies, Researches and Applications*. 2021:559-627.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-64781-0>

25- Dehbani M, Rahimi M, Rahimi Z. A review on convective heat transfer enhancement using ultrasound. *Applied Thermal Engineering: A Leading Journal in the Field* It is published by Elsevier. 2022 May 25;208:118273.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118273>

26- Menni Y, Azzi A, Chamkha A. Enhancement of convective heat transfer in smooth air channels with wall-mounted obstacles in the flow path: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry: A Leading Publication in the Field* it is published by Springer Nature. 2019 Feb 28;135:1951-76. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7268-x>

27- Patel AK. Advancements in heat exchanger design for waste heat recovery in industrial processes. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023;19(3):137-52. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.3.1763>

28- Hussien AA, Al-Kouz W, El Hassan M, Janvekar AA, Chamkha AJ. A review of flow and heat transfer in cavities and their applications. *The European Physical Journal Plus* part of Springer Nature 2021. 2021 Apr 1;136(4):353. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01320-3>

29- Hou T, Chen Y. Pressure drop and heat transfer performance of microchannel heat exchanger with different reentrant cavities. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification* it is published by Elsevier. 2020 Jul 1;153:107931.

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107931>

30- Zaboli M, Ajarostaghi SS, Noorbakhsh M, Delavar MA. Effects of geometrical and operational parameters on heat transfer and fluid flow of three various water based nanofluids in a shell and coil tube heat exchanger *SN Applied Sciences: A Multidisciplinary Journal* it is published by Springer Nature. 2019 Nov;1:1-7.

<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1431-2>

31- Zöllner A, Winter ER, Viskanta R. Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-facades. *International Journal of Heat and Mass Transfer* it is published by Elsevier. 2002 Oct 1;45(22):4401-8.

[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00160-6)

32- Tao Y, Fang X, Setunge S, Tu J, Liu J, Shi L. Naturally ventilated double-skin façade with adjustable louvers. *International Solar Energy Society (ISES): Solar Energy* is the official journal of ISES. 2021 Sep 1;225:33-43. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.013>

