

Investigating Air Flow and Heat Transfer in An Open-Joint Ventilated Façade; The case of an Office Building in Isfahan

Najmeh Malekipour

M.A. Advancement in Architecture and Urban Planning Research Center,
Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Narges Dehghan, Ph.D. 

Assistant Professor, Advancement in Architecture and Urban Planning
Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Received: May 05, 2024

Revised: August 31, 2024

Accepted: September 14, 2024

(Pages: 19–42)

Malekipour, Najmeh, and Narges Dehghan. "Investigating Air Flow and Heat Transfer in An Open-Joint Ventilated Façade; The case of an Office Building in Isfahan". *Soffeh* 35, no. 4 (2025): 19–42.

DOI: <http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.225454.1120>

Abstract:

Background and objectives: The backdrop to this research is the need to adopt innovative façade systems—particularly open joint ventilated façades—to optimize energy consumption in buildings. International studies, especially those conducted in Mediterranean climates, have widely confirmed the effectiveness of these façade systems in reducing thermal loads and enhancing natural ventilation. However, in Iran—particularly in hot and dry climates—related studies have been limited and inadequate. The main objective of this study is to investigate the impact of three key parameters: the percentage of ventilated façade coverage, the air cavity thickness between the two skins, and the installation height of the façade

Keywords:

Open-joint ventilated
façade, Energy saving,
Building envelope, Heat
transfer.



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 35, Issue 4, No. 111, 2026



P-ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*. Corresponding Author Email Address: nargesdehghan@iau.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/SOFFEH.2025.225454.1120>

on airflow, interior surface temperature, and energy consumption in office buildings located in Isfahan. Based on numerical simulation and sensitivity analysis, this research aims to provide an optimised model for designing double-skin façades adapted to Iran's climatic conditions.

Materials and methods: The study follows a quantitative and applied approach using numerical simulation to analyse the thermal performance and airflow behaviours of an open joint ventilated façade in an office building located in the hot and dry climate of Isfahan. For this purpose, ANSYS Fluent was used for Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis, and Designbuilder was used to evaluate seasonal energy consumption. The base model consisted of an 8-story building with a south-facing façade covered with modular ceramic panels featuring open joints. Six façade coverage ratios (0%, 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%), two cavity thicknesses (4 and 6 cm), and three vertical installation levels (ground floor, fourth floor, and eighth floor) were defined and analysed. Simulations were performed for two key timeframes: summer solstice (June 21) and winter solstice (December 21). Through sensitivity analysis, the individual impact of each independent variable on dependent parameters—such as air velocity, interior surface temperature, heat flux, and overall energy consumption—was thoroughly evaluated.

Results and conclusion: The findings revealed that open joint ventilated façades, when optimally designed, significantly improve thermal performance and reduce energy consumption in office buildings in hot and dry climates like Isfahan. In the optimal case—60% to 80% façade coverage, 6 cm cavity thickness, and installation at the fourth floor—air velocity fell within the ideal range for natural ventilation, and the interior surface temperature was noticeably reduced. Heat flux in summer decreased by more than 50%, and energy consumption was reduced by up to 46% in summer and 50% in winter, compared to a standard single-skin façade. Sensitivity analysis indicated that installation height, coverage ratio, and cavity thickness were, respectively, the most influential variables. It was also found that excessive height or cavity thickness could negatively affect airflow and increase energy demand. Based on these results, the use of open joint ventilated façades is strongly recommended, especially for government and office buildings in hot Iranian climates.

بررسی جریان هوا و انتقال حرارت در نمای تهویه شده با درز باز^۱

مطالعه موردی: ساختمان اداری شهر اصفهان

نجمه ملکی پور^۲

نرگس دهقان^۳

دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۲

بازبینی: ۱۰ شهریور ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۴ شهریور ۱۴۰۳

(صفحه ۱۹-۴۲)

استادیار مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

ملکی پور، نجمه، و نرگس دهقان. «بررسی جریان هوا و انتقال حرارت در نمای تهویه شده با درز باز: مطالعه موردی: ساختمان اداری شهر اصفهان». فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صفا، سال ۳۵، شماره ۴ (۱۴۰۴): ۱۹-۴۲.

کلیدواژگان: نمای تهویه‌شده با درز باز، صرفه‌جویی انرژی، پوسته ساختمان، انتقال حرارت.

چکیده

اهداف و پیشینه: در پیشینه این پژوهش به ضرورت استفاده از سیستم‌های نوین نماسازی، به‌ویژه نماهای تهویه‌شده با درز باز، به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها پرداخته شده؛ چراکه در مطالعات بین‌المللی، به‌ویژه در اقلیم‌های مدیترانه‌ای، به‌طور گسترده‌ای بر اثربخشی این نماها در کاهش بار حرارتی و بهبود تهویه طبیعی تأکید گردیده است، اما در ایران، به‌ویژه در اقلیم گرم و خشک، آنچه مشاهده می‌شود، پژوهش‌های محدود و ناقصی در این زمینه است. هدف اصلی در این مطالعه، بررسی تأثیر درصد پوشش نمای تهویه‌شده، ضخامت لایه هوای بین دو پوسته و ارتفاع نصب نما بر جریان هوا، دمای سطح داخلی، و مصرف انرژی ساختمان‌های اداری در شهر اصفهان است. در این پژوهش تلاش شده تا با تکیه بر شبیه‌سازی عددی و تحلیل حساسیت، الگویی بهینه برای طراحی نمای دوپوسته در شرایط اقلیمی ایران عرضه گردد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با رویکردی کمی و ماهیتی کاربردی، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، عملکرد حرارتی و جریان هوای نمای تهویه‌شده با درز باز در یک ساختمان اداری واقع در اقلیم گرم و خشک

اصفهان بررسی شده است. برای این منظور، از نرم‌افزار آنسیس فلوئنت برای تحلیل دینامیک سیالات (CFD) و از طراحی بیلدر برای محاسبه مصرف انرژی استفاده شد. مدل پایه شامل ساختمانی ۸ طبقه با نمای جنوبی مجهز به صفحات سرامیکی مدولار با درز باز بود که در ۶ حالت درصد پوشش (از ۰ تا ۱۰۰٪)، دو ضخامت حفره (۴ و ۶ سانتی‌متر)، و سه ارتفاع مختلف (طبقات همکف، چهارم، و هشتم) تحلیل شد. نتایج شبیه‌سازی در دو بازه زمانی انقلاب تابستانی و زمستانی بررسی و با تحلیل حساسیت، تأثیر هر متغیر مستقل بر متغیرهای وابسته‌ای چون سرعت جریان هوا، دمای سطح داخلی، شار حرارتی، و مصرف انرژی ارزیابی شد.

نتایج و جمع‌بندی: نتایج پژوهش نشان داد که نمای تهویه‌شده با درز باز در اقلیم گرم و خشک اصفهان، در صورت طراحی بهینه، تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد حرارتی و کاهش مصرف انرژی ساختمان‌های اداری دارد. در حالت بهینه، یعنی با پوشش ۶۰ تا ۸۰ درصدی نما و ضخامت لایه هوای ۶ سانتی‌متر و نصب در طبقه چهارم، سرعت جریان هوا به محدوده مطلوب برای تهویه طبیعی رسید و دمای سطح داخلی نما کاهش یافت. همچنین، شار حرارتی در تابستان تا بیش از ۵۰٪ کاهش و مصرف انرژی نسبت به نمای معمولی تا ۴۶٪ در تابستان و ۵۰٪ در زمستان صرفه‌جویی را نشان داد. تحلیل حساسیت نیز بیانگر آن بود که ارتفاع

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد گرایش معماری و انرژی نگارنده اول با عنوان طراحی ساختمان اداری با هدف دستیابی به مؤلفه‌های بهینه نماهای تهویه‌شونده با درز باز در اقلیم گرم و خشک اصفهان است که با راهنمایی نگارنده دوم در دانشکده هنر، معماری و شهرسازی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد در تاریخ بهمن‌ماه سال ۱۳۹۹ دفاع شده است.

۲. کارشناس ارشد مرکز تحقیقات افق‌های نوین در معماری و شهرسازی، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

najmehmalekipour@gmail.com

۳. نویسنده مسئول

nargesdehghan@iau.ac.ir



پرسش‌های پژوهش

۱. نسبت سطح بهینه نمای تهویه‌شده با درز باز در یک ساختمان اداری متعارف در اقلیم اصفهان در چه میزانی مطلوب است؟
۲. ضخامت لایه هوای بهینه در نمای تهویه‌شده با درز باز در یک ساختمان اداری متعارف در اقلیم اصفهان در چه میزانی مطلوب است؟
۳. رفتار حرارتی و جریان هوا در حالت‌های مختلف ارتفاعی در یک ساختمان اداری متعارف در اقلیم اصفهان چگونه است؟

4. J. Pirkandi and M. Hashemabadi, "Design and Numerical Investigation of a Small Scale Solar Chimney Using Computational Fluid Dynamics", *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016): 272.

5. M.N. Sánchez, et al., "Experimental Assessment of the Performance of Open Joint Ventilated Façades with Buoyancy-driven Airflow", *Solar Energy*, 91 (2013): 133.

ع محمدجواد ثقفی و ناهید توسلی، «بررسی تأثیر لایه هوای تهویه‌شده در نماهای نوین با درز باز بر عملکرد حرارتی ساختمان»، نقش جهان، سال ۶، ش. ۳ (پاییز ۱۳۹۵): ۱۰.

7. Sánchez, et al., "Experimental Evaluation of the Airflow Behaviour in Horizontal and Vertical Open Joint Ventilated Facades Using Stereo-PIV", *Renewable Energy*, 109 (2017): 620.

8. A. Sharma, et al., "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2) (2009): 320.

9. F. Stazi, et al., "Experimental Assessment of a Zinc-titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate", *Energy and Buildings*, 69 (2014): 530.

نصب نما، سطح پوشاندگی، و ضخامت لایه هوا به ترتیب بیشترین تأثیر را بر عملکرد نما دارند؛ بنابراین استفاده از این نوع نما، به‌ویژه در ساختمان‌های اداری دولتی در اقلیم‌های گرم ایران، توصیه می‌شود.

مقدمه

بهره‌گیری از تهویه طبیعی راهکار بااهمیتی در طراحی پایدار ساختمان است که قرن‌ها مورد استفاده بشر بوده و به‌خاطر مزایای بالقوه‌اش نسبت به سیستم‌های مکانیکی، از نظر انرژی مورد نیاز و منافع اقتصادی و زیست‌محیطی آن، مورد توجه فزاینده‌ای بوده است. از سوی دیگر، با تهویه طبیعی، در شرایط مناسب اقلیمی و عملکردی، حدود ۱۰٪ در بار سرمایشی و حدود ۱۵٪ در میزان برق مصرفی در سال صرفه‌جویی می‌شود.^۴ یکی از کاربردهای تهویه طبیعی و یکی از مهم‌ترین اهداف طراحی انرژی‌محور ساختمان‌ها، استفاده مناسب از ویژگی‌های پوسته ساختمان طبق شرایط آب‌وهوایی است.^۵

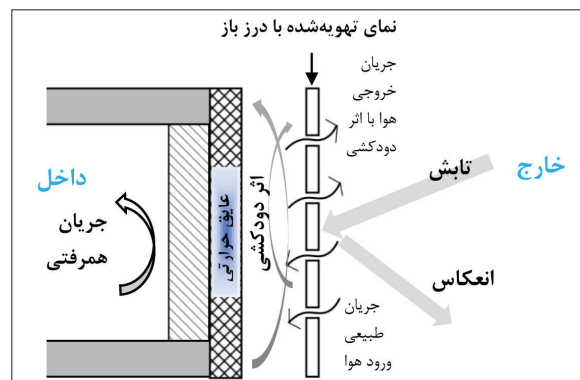
ضرورت صرفه‌جویی در مصرف انرژی و سبک‌سازی ساختمان سبب به‌کارگیری سیستم‌های نوین نماسازی شده است.^۶ در سال‌های اخیر، معماران علاقه خاص و بسیار قابل‌توجهی به نمای تهویه‌شده یافته‌اند. نمای تهویه‌شده موضوع جدیدی نیست، اما کاربرد آن در سال‌های اخیر که ساختمان‌ها با مصرف انرژی پایین در اولویت هستند، به موضوعی پرکاربرد تبدیل شده است. مهم‌ترین دلیل رایج شدن این نوع نما، تنوع در رنگ، شکل، مصالح آن، و اجرای بسیار سریع و آسان است و تهویه در این نماها باعث رفع رطوبت ناشی از بارندگی، کاهش مشکلات ناشی از میعان، و تضمین سلامت دیوار می‌شود و استفاده از آن در ضلع جنوبی ساختمان در اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و مرطوب مناسب‌تر است.^۷ نماهای تهویه‌شده متعددی وجود دارند، مانند نماهای دوپوسته، نمای ترکیبی با سلول‌های فتوولتائیک، دودکش خورشیدی، دیوار ترومب، و دیوار خورشیدی یا نمای کلکتور خورشیدی، در این میان، دیوار ترومب با توجه به بهترین عملکرد تهویه، گرمایش و سرمایش ساختمان^۸، ازجمله سیستم‌هایی است که بیشترین توجه را برانگیخته و مطالعات زیادی بر روی بهبود عملکرد آن برای فضاهای مسکونی^۹، تجاری^{۱۰}، و ساختمان‌های صنعتی^{۱۱} صورت گرفته است. یکی از آنها، سیستم‌های ترکیبی انرژی خورشیدی و دیوار ترومب، نماهای غیرشفاف تهویه‌شده، هستند که کمتر مورد



انرژی در کاربری اداری، این نوع کاربری در این مقاله مورد نظر است.

۱. نماهای تهویه شده

عملکرد نماهای مات تهویه شده این گونه است: لایه خارجی معمولاً از پنل‌های مدولار تشکیل شده است که قابلیت جابه‌جایی دارند و می‌توان پنل‌های دیگری را در آنها ادغام کرد^{۱۵} و لایه هوا بین دیوار خارجی و عایق متصل به آن و دیوار داخلی وجود دارد. جریان هوای داخل محفظه^{۱۶}، به دلیل خاصیت شناوری و همرفتی با جریان هوای خارجی، در بین دو لایه جابه‌جا می‌شود. در حال حاضر سیستم‌های مختلفی از نماهای تهویه شده وجود دارند که هر کدام از آنها شامل محفظه هوا بین دو پوسته و یک لایه عایق است، که در طول نما پیوسته است.^{۱۷} نماهای تهویه شده دو نوع گسترده دارند: نمای با درز باز، نمای با درز بسته. نماهای با درز باز با کمک اثر دودکشی به هوا، اجازه جابه‌جایی بین محفظه هوا و لایه خارجی را می‌دهد و این امر از طریق منافذ موجود در آن لایه صورت می‌گیرد (ت ۱). در این نوع نما، معمولاً هوا از قسمت بیرون و از طریق منافذ نیمه پایین دیوار به داخل محفظه وارد می‌شود و به تدریج از طریق منافذ نیمه بالای دیوار از آن خارج می‌شود.^{۱۸} در نمای



توجه بوده‌اند. تفاوت عمده نوع اخیر با دیوار ترومب، پوسته خارجی مات و غیرشفاف آن است. یکی از این سیستم‌های نما که در سال‌های اخیر کاربرد زیادی در معماری یافته، نمای تهویه شده با درز باز^{۱۲} است. استفاده از این نما علاوه بر سبکی و پایداری سازه‌ای، سرعت کار را بیشتر می‌کند و نیروی کار تخصصی کمتری می‌طلبد و در نتیجه باعث صرفه‌جویی در هزینه و زمان و مصالح می‌گردد. نما با اجرای خشک در ایران نیز در ساختمان‌های جدید یا بازسازی ساختمان‌های موجود رایج شده است، اما اجرای نماهای با درز باز در ایران اغلب بدون توجه به تأثیر باز بودن درزها، تهویه ایجاد شده در نما، و در نظر گرفتن هندسه نما بر عملکرد حرارتی آن است. تحقیق درباره جریان هوا و انتقال حرارت (مؤثر بر صرفه‌جویی در انرژی) در نمای تهویه شده با درز باز، به دلیل استفاده فراوان از آن در سال‌های اخیر، چالش‌های زیادی را برانگیخته و مطالعه رفتار انرژی آن به موضوعی قابل توجه تبدیل شده است، ولی مطالعات پیشین اغلب در اقلیم گرم و مدیترانه‌ای اسپانیا بوده و فقط یک پژوهش در مورد ایران و اقلیم گرم و خشک انجام شده است. بررسی نحوه رفتار حرارتی سیال و انتقال حرارت در اقلیم گرم و خشک (ضعف تحقیقات)، برخلاف سایر تحقیقات که در اقلیم مدیترانه‌ای اسپانیا انجام گرفته، نوآوری این پژوهش تلقی می‌گردد.^{۱۳} از طرف دیگر، در میان انواع ساختمان‌ها، ساختمان‌های اداری مصرف انرژی بالایی دارند و متوسط مصرف انرژی سالانه برای این نوع ساختمان‌ها در ایران با وجود ساعت کاری ۸ الی ۱۰ ساعته در روز، برابر با ۳۵۰ kwh بر مترمربع است که این میزان، ضریب بالایی از نظر مصرف انرژی دارد.^{۱۴} اغلب ساختمان‌های اداری در ایران دولتی و نیمه‌دولتی هستند و مصرف انرژی بر درآمد کارکنان آن ادارات تأثیری ندارد، در نتیجه مدیریت انرژی در آنها جدی نیست. بر اساس سیاست‌های اخیر دولت مبنی بر مدیریت صحیح

10. S. Jaber and S. Ajib, "Optimum Design of Trombe Wall System in Mediterranean Region", *Solar Energy*, 85(9) (2011): 1895.

11. M. Rabani, et al., "Heat Transfer Analysis of a Trombe Wall with a Projecting Channel Design", *Energy*, 134 (2017): 947.

12. Open Joint Ventilated Facade

13. F. Bagheri, et al., "Developing Energy Performance Label for Office Buildings in Iran", *Energy and Buildings*, 61(2013): 120.

۱۴. استاندارد ملی ایران ۱۴۲۵۴، ساختمان‌های غیرمسکونی - تعیین معیار مصرف انرژی و دستورالعمل برچسب انرژی، ۲۳.

15. J. Falk and K. Sandin, "Ventilated Rainscreen Cladding: A Study of the Ventilation Drying Process", *Building and Environment*, 60 (2013): 175.

16. cavity

ت ۱. رفتار هوا در نمای تهویه شده با درز باز، طرح و تدوین: نگارندگان.

17. C. Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", *Solar Energy*, 85(9) (2011): 1852.

18. Ibid, 1860.19. Falk and Sandin, "Ventilated Rainscreen Cladding: A Study of the Ventilation Drying Process", 180; H. Poirazis, "Double Skin Facades for Office Buildings", *Division of Energy and Building Design* (Lund: Lund Institute of Technology, 2004), 68.

20. D.M. Sefcik, et al., "Natural Convection in Vertically Vented Enclosures", *Journal of Heat Transfer*, 113(4) (1991): 915.

21. A.L. Pica, et al., "An Experimental Investigation on Natural Convection of Air in a Vertical Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (1993): 611-616.

جدول ۱. جدول خلاصه پیشینه مطالعاتی نماهای تهویه شده با تأکید بر شرایط اقلیمی، تدوین: نگارندگان.

با درز بسته، پنل‌های خارجی پیوسته و بدون منفذ است، در این مورد تهویه با کمک جریان همرفتی از طریق دریچه‌های بالایی و پایینی در پوسته خارجی نما امکان‌پذیر است.^{۱۹} در این دو نوع نما، لایه‌های بیرونی و درونی بسیار مشابه رفتار می‌کنند و تفاوت اصلی آنها به رفتار جریان هوا مربوط می‌شود.

از جمله اولین تحقیقات در مورد نمای تهویه شده می‌توان به مطالعه سفیک و همکاران^{۲۰} درباره تهویه طبیعی در محفظه بسته عمودی، پیکا^{۲۱} و نایلار^{۲۲} درباره تهویه طبیعی با کانال عمودی بین دو ورق داغ الکتریکی، استراتمن و همکاران^{۲۳} درباره تهویه طبیعی بین صفحات گرم خم‌شونده، تاندا درباره تأثیر تهویه طبیعی در یکی از ورق‌ها^{۲۴} اشاره کرد. نویسندگانی چون لوپز^{۲۵}، فرانسس^{۲۶}، سرا^{۲۷}، و سوارز^{۲۸} مطالعات زیادی بر روی تحلیل حرارتی (عددی و تجربی) نماهای تهویه شده انجام داده‌اند. از نتایج آنها برمی‌آید که کاهش بار حرارتی ساختمان در فصل تابستان صورت می‌گیرد. در تحقیق دیگری نیز مدل واقعی نمای تهویه شده ساخته شد و از طریق نرم‌افزار

ای‌اس‌پی-آر^{۲۹} آزمایش و شبیه‌سازی شد. نتایج این کار نشان داد که حدوداً ۵۸٪ از بار حرارتی با استفاده از این نوع نما، صرفه‌جویی می‌شود و این نوع نماها، راه حلی کارآمد برای جلوگیری از گرمای تابشی به پوسته ساختمان است و در نتیجه سبب کاهش نیاز به انرژی به منظور خنک‌سازی فضا می‌شود.^{۳۰}

۱.۱. نماهای تهویه شده با درز باز

نماهای مات تهویه شده در ابتدا در کشورهای شمالی اروپا اجرا شد، و اخیراً به‌خاطر کاهش بیشتر بار سرمایشی با این نوع نما، در کشورهای جنوبی اروپا نیز استفاده می‌شود. عملکرد حرارتی نماهای تهویه شده بستگی به پارامترهای خارجی و شرایط اقلیمی (تابش خورشیدی، جهت و سرعت باد، و درجه حرارت هوا) و طراحی نما (هندسه، مصالح، و غیره) دارد.^{۳۱} در «جدول‌های ۱ و ۲» خلاصه پیشینه مطالعاتی این نوع نماها، که اغلب پژوهشگران در مورد آن به تحقیق پرداخته‌اند، در دو حالت شرایط خارجی، هندسه نما و شرایط ساخت بررسی می‌شود.

منبع	شهر مورد مطالعه (اقلیم)	متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته	نتایج
Peci-López and Ruiz de Adana, "Sensitivity Study of an Opaque Ventilated Façade in the Winter Season in Different Climate Zones in Spain", 524.	۱۲ شهر در اسپانیا (مدیرانه‌ای)	شرایط اقلیمی (دما، تابش و سرعت باد)	دما و سرعت سیال - کارایی انرژی	تابش خورشیدی بیشترین اثر را در بین متغیرها دارد. اقلیم‌هایی با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل تر برای استفاده از نماهای تهویه شده بهتر است.
Alonso, et al., "Energy Consumption to Cool and Heat Experimental Modules for the Energy Refurbishment of Façades. Three Case Studies in Madrid", 258.	مادرید اسپانیا (مدیرانه‌ای)	نوع نما (مقایسه نمای معمولی با تهویه شده)	کارایی انرژی	نماهای تهویه شده ۱۳.۳٪ کارآمدتر از نمونه‌های معمولی (نمای دوپوسته بدون تهویه محفظه هوا) هستند. برای اقلیم با زمستان غالب، سیستم نما با عایق حرارتی مؤثرتر از نماهای تهویه شده است.
Suárez, et al., "Heat Transfer and Mass Flow Correlations for Ventilated Facades", 3696.	مادرید اسپانیا (مدیرانه‌ای)	نوع نما (مقایسه نمای تهویه شده با درز بسته با تهویه شده با درز باز)	صرفه جویی در مصرف انرژی	۹٪ صرفه‌جویی سالانه انرژی در نماهای تهویه شده با درز باز در مقایسه با درز بسته در اقلیم‌هایی با تابستان‌های گرم و زمستان معتدل

22. D. Naylor and J.D. Tarasuk, "Natural Convective Heat Transfer in a Divided Vertical Channel: Part II—Experimental Study", *Journal of Heat Transfer*, 115(2) (1993): 390.
23. A.G. Straatman, et al., "A Study of Natural Convection Between Inclined Isothermal Plates", *Journal of Heat Transfer*, 116(1) (1994): 243-245.
24. G. Tanda, "Natural Convection Heat Transfer in Vertical Channels with and without Transverse Square Ribs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(9) (1997): 2180.
25. F. Peci-López and M. Ruiz de Adana, "Sensitivity Study of an Opaque Ventilated Façade in the Winter Season in Different Climate Zones in Spain", *The Open Renewable Energy Journal*, 75 (2015): 530.

ادامهٔ جدول ۱.

جدول خلاصهٔ پیشینهٔ مطالعاتی نماهای تهویه‌شده با تأکید بر شرایط اقلیمی، تدوین: نگارندگان.

منبع	شهر مورد مطالعه (اقلیم)	متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته	نتایج
Giancola, et al., "Experimental Assessment and Modelling of the Performance of an Open Joint Ventilated Façade During Actual Operating Conditions in Mediterranean Climate", 363.	آلمریا در اسپانیا (گرم و نیمه‌خشک)	مقایسه در دو فصل تابستان و زمستان	کارایی انرژی	نویسندگان رفتار تهویه در نماهای تهویه‌شده در اقلیم گرم را این‌گونه خلاصه می‌کنند: «در زمستان، نما مانند عایق حرارتی خوب عمل می‌کند؛ زیرا زمانی که مقادیر تابش زیاد است، دمای هوای خروجی از درزهای نما نسبت به دمای محیط داخلی بالاتر است، که این باعث می‌شود که گرمای محیط از دست نرود. زمانی که تابش و درجه حرارت هوای خروجی از درزها کمتر است، تعادل انرژی منفی است. در تابستان، هوایی که از نما خارج می‌شود، بخشی از بار حرارتی را از نما حذف می‌کند و باعث کاهش جذب گرما در محیط داخلی می‌شود، باین‌حال، زمانی که دمای بیرونی و تابش خورشیدی بسیار زیاد است، می‌تواند افزایش گرمای داخلی داشته باشد.
Soto Francés, et al., "Modeling of Ventilated Façades for Energy Building Simulation Software", 419.	کستلون در اسپانیا (گرم و نیمه‌خشک)	تأثیر شرایط اقلیمی (سرعت باد، تابش خورشید، دما)	مصرف انرژی	تأیید کردند که تأثیر تابش خورشیدی بیشتر از دمای بیرون و باد است.
Gagliano, and Aneli, "Analysis of the Energy Performance of an Opaque Ventilated Façade under Winter and Summer Weather Conditions", 531.	کاتانیا در ایتالیا (مدیترانه‌ای)	مقایسه در دو فصل تابستان و زمستان	کارایی انرژی	نویسندگان به این نتیجه رسیدند که نمای تهویه‌شده باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۲۰٪ تا ۵۰٪ در زمستان و ۴۰٪ تا ۵۰٪ در تابستان بسته به جهت نما و شدت نما می‌شود.
Schabowicz, and Zawislak, "Numerical Comparison of Thermal Behaviour Between Ventilated Facades", 297.	وراتسلاف در لهستان (معتدل اقیانوسی)	مقایسه در دو فصل تابستان و زمستان	مقایسه رفتار حرارتی	۴۰٪ صرفه‌جویی در انرژی در تابستان با استفاده از نمای تهویه‌شده در مقایسه با همان نما بدون تهویه اتفاق می‌افتد، تا زمانی که تابش خورشیدی کافی در نما وجود داشته باشد.
Gregório-Atem, et al., "Opaque Ventilated Façade (OVF) Thermal Performance Simulation for Office Buildings in Brazil. Sustainability", 7635; Maciel, and Carvalho, "Operational Energy of Opaque Ventilated Façades in Brazil", 100775.	۱۶ شهر در برزیل (معتدل تا خشک)	مقایسه شرایط اقلیمی	کارایی حرارتی	مقایسه‌ای بسیاری در استفاده از نماهای تهویه‌شده با درز باز در اقلیم‌های گرم (A و B بر اساس تقسیم‌بندی کوپن) وجود دارد.
Peri-López, et al., "Experimental Analysis and Model Validation of an Opaque Ventilated Façade", 265.	اسپانیا (مدیترانه‌ای)	تغییر سرعت و جهت باد در محیط آزمایشگاهی	کارایی انرژی	سرعت و جهت باد مستقیماً بر عملکرد نماهای تهویه‌شده تأثیر گذارند. هرچه سرعت باد افزایش یابد، جریان هوا سریع‌تر تعویض می‌شود.
Gagliano, et al., "Computational Fluid Dynamic Simulations of Natural Convection in Ventilated Facades", 131.	کاتانیا در ایتالیا (مدیترانه‌ای)	مقایسه سرعت و جهت متفاوت باد در دو نمای تهویه‌شده و تهویه‌نشده	صرفه جویی در انرژی	نماهای تهویه‌شده صرفه‌جویی در محدوده ۴۷٪ انرژی را (به سمت باد ۵ m/s) تا ۵۱٪ (بدون باد) در مقایسه با نمای بدون تهویه نشان دادند.
Stazi, et al., "Experimental Assessment of a Zinc-titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate", 525.	آنکونا در ایتالیا (مدیترانه‌ای)	فشار و سرعت باد در محیط آزمایشگاهی	کارایی انرژی	نشان دادند که فشار باد بر میزان جریان هوا در نماهای پایین‌تر تأثیر می‌گذارد، درحالی‌که برای نماهای بالاتر تأثیر زیادی ندارد.
ثقفی و توسلی، «بررسی تأثیر لایهٔ هوای تهویه‌شده در نماهای نوین با درز باز بر عملکرد حرارتی ساختمان»، ۱۰.	تهران و یزد (گرم و خشک)	اقلیم متفاوت یزد و تهران	صرفه جویی در انرژی	نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از این نما در تابستان و در شهر تهران و یزد منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود.

جدول ۲. خلاصه پیشینه نماهای تهویه شده
با تأکید بر هندسه و شرایط ساخت.
تدوین: نگارندگان.

در مقالاتی که در آنها شرایط خارجی ارزیابی شده اند، تابش
خورشیدی متغیری است که بیشترین تأثیر را بر عملکرد نماهای

منبع	دسته اقلیمی	متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته	نتایج
Fantucci, et al., „An Experimental Sensitivity Analysis on the Summer Thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade”; Sanjuan, et al., „Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade”, 1851; Stazi, et al., „Experimental Evaluation of Ventilated Walls with an External Clay Cladding”.	معتدل اقیانوسی	جهات متفاوت نما، ارتفاع نما	عملکرد سیال و صرفه جویی در انرژی	جریان هوا در داخل محفظه تحت تأثیر ارتفاع کانال تهویه است، اما تعداد کمی از نویسندگان تأثیر این متغیر را ارزیابی کرده اند. به طور کلی، هرچه نما بلندتر باشد، سرعت و میزان جریان هوا در داخل محفظه و پتانسیل صرفه جویی در انرژی این نماها بیشتر است.
Stazi, et al., “Experimental Assessment of a Zinc-Titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate”.	مدیترانه ای	ارتفاع نما	کارایی انرژی	نماهای پایین تر عملکرد بدتری دارند؛ زیرا تابش منعکس شده از زمین را دریافت می کنند و با کاهش ارتفاع کانال هوا، دمای کانال با کاهش اختلاف دمای داخلی و خارجی افزایش می یابد.
Pastori, et al., “Energy Performance Evaluation of a Ventilated Façade System through CFD Modeling and Comparison with International Standards.”; Stazi, et al., “Experimental Assessment of a Zinc-Titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate”, 525.	مدیترانه ای	ارتفاع نما	کارایی انرژی	در نظر گرفتن کارایی نما در طول ارتفاع آن برای طراحی عملکرد صحیح انرژی ساختمان ضروری است.
Fantucci, et al., „An Experimental Sensitivity Analysis on the Summer Thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade”.	معتدل اقیانوسی	رنگ	انتقال حرارتی	رنگ متغیری است که بیشترین تأثیر را بر عملکرد انرژی نماهای تهویه شده دارد. رنگ روشن بار حرارتی را تا ۸۰٪ و رنگ تیره تا ۳۱٪ در مقایسه با نمای بدون تهویه، کاهش می دهد.
Marinosci, et al., “Experimental Analysis of the Summer Thermal Performances of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building”, 280.	معتدل اقیانوسی	شرایط اقلیمی متفاوت در تابستان	کارایی حرارتی	در نظر گرفتن ضریب بالای جذب خورشیدی باعث افزایش دمای هوا دیواره بیرونی در روزهای آفتابی می شود، که نه تنها، به دلیل اثر شناوری، باعث افزایش سرعت هوا در داخل محفظه می شود، بلکه تابش حرارتی موج بلند در داخل محفظه را نیز ایجاد می کند. استفاده از ضریب جذب خورشیدی کمتر باعث کاهش بار گرمایی تابستان خواهد شد.
Gregório-Atem, et al., “Opaque Ventilated Façade (OVF) Thermal Performance Simulation for Office Buildings in Brazil. Sustainability”.	اقلیم معتدل تا خشک	رنگ - شرایط اقلیمی متفاوت	کارایی انرژی	از رنگ های روشن در اقلیم های گرم به ویژه در نماهای بدون عایق حرارتی استفاده کنید.
Balter, et al., “Air Cavity Performance in Opaque Ventilated Façades in Accordance with the Spanish Technical Building Code”, 211; Marinosci, C., et al., “Experimental Analysis of the Summer Thermal Performance s of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building.”, 280.	معتدل	عمق و ارتفاع حفره - طول و عرض درز	انتقال حرارتی	نماهای تهویه شده با درز باز، کاهش بار حرارتی را در طول تابستان کاهش می دهند، هرچه درصد سطح درزهای باز بیشتر باشد، سرعت هوا در محفظه بیشتر است، اما این سرعت زمانی بیشتر است که درزها فقط در قسمت بالایی و پایینی نما باشند.
Suárez, et al., “Heat Transfer and Mass Flow Correlations for Ventilated Facades”.	مدیترانه ای	نمای تهویه شده با درز باز در قیاس با درز بسته	مطالعه رفتار حرارتی سیال	درز باز جریان تهویه در محفظه هوا را مؤثر می کند و انتقال گرما را کاهش می دهد. سرعت هوا در این نماها با درز باز تا پنج برابر با نمونه بدون درز رقابت می کند و الگوی جریان نیز در این دو نوع متفاوت است. الگوی هوا در این نوع نما با درز باز صعودی و در درز بسته حلقوی است.
Sanjuan, et al., “Energy Performance of an Open-Joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade”, 1851; Sánchez, et al., “Experimental Assessment of the Performance of Open Joint Ventilated façades with Buoyancy-driven Airflow”; Sánchez, et al., “Experimental evaluation of the airflow behaviour in horizontal and vertical Open Joint Ventilated Facades Using Stereo-PIV”, 613.	مدیترانه ای	نمای تهویه شده با درز باز در قیاس با نمای معمولی	مطالعه رفتار حرارتی سیال	با گرم کردن پوسته بیرونی در نماهای تهویه شده با درز باز، جریان هوا صعودی، ناهمگن، و غیرمستقر خواهد بود. فارغ از تعداد اسلب ها، هوا از دریچه پایینی وارد می شود و از دریچه بالایی خارج می شود و سرعت و میزان جریان هوا افزایش می یابد. بیشترین سرعت جریان هوا در میانه ارتفاع نما اتفاق می افتد.

تهویه شده می‌گذارد. در نوع نماهای مورد نظر، صرفه‌جویی در مصرف انرژی با تابش خورشید افزایش می‌یابد. آنها در قاره اروپا و کشورهای اسپانیا، ایتالیا، و پرتغال با اقلیم مدیترانه‌ای صورت گرفته است. تنها تحقیق در ایران در اقلیم

گرم و خشک را ثقفی و همکاران^{۳۳} انجام داده‌اند که در آن همان‌طور که در تحقیقات گذشته نشان داده شد، اغلب نماهای تهویه شده با تأکید بر هندسه و شرایط ساخت، تدوین: نگارندگان. ادامه جدول ۲. خلاصه پیشینه

منبع	دسته اقلیمی	متغیرهای مستقل	متغیرهای وابسته	نتایج
Fantucci, et al., "An Experimental sensitivity Analysis on the summer thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade".	معتدل اقیانوسی	رنگ	انتقال حرارتی	درزهای باز در بخش‌های بالایی و پایینی نما باعث ایجاد عملکرد متوسطی در نما می‌شود.
Gagliano, et al., "Analysis of the energy Performance of an Opaque Ventilated Façade under Winter and Summer Weather Conditions", 531.	مدیترانه‌ای	مقایسه در دو فصل تابستان و زمستان	کارایی انرژی	نماهای تهویه شده شرقی و غربی در تابستان و نماهای جنوبی در زمستان کاربری بهتری دارند.
Stazi, et al., "Experimental Evaluation of Ventilated Walls with an External Clay Cladding".	معتدل اقیانوسی	جهات متفاوت و ارتفاع نما	عملکرد سیال و صرفه‌جویی در انرژی	ارتفاع بالاتر نمای تهویه شده و در جهت جنوبی در تابستان به دلیل سرعت بالاتر هوا کارایی بیشتری دارد.
Iribar-Solaberrieta, et al., "Energy Performance of the Opaque Ventilated Facade.", 55.	استوایی	مصالح متنوع نمای داخلی و خارجی بین دو لایه	تقاضای انرژی	جهت قرارگیری بهینه نمای تهویه شده به میزان تابش نور خورشید در آن جهت و در فصل مورد نیاز بستگی دارد.
García, et al., "Comparison of Theoretical Heat Transfer Model with Results from Experimental Monitoring Installed in a Refurbishment with Ventilated Façade"	مدیترانه‌ای	استفاده از عایق‌های متنوع	کارایی انرژی	کاهش ۲۶۰۷٪ جریان حرارتی با اضافه کردن ۱۵ سانتی‌متر عایق حرارتی به محفظه هوا
Stazi, et al., "Experimental Comparison between Three Types of Opaque Ventilated Facades", 296; Pergolini, et al., "Controlled Inlet Airflow in Ventilated Facades: a Numerical Analysis"; Stazi, et al., "The Role of Wall Layers Properties on the Thermal Performance of Ventilated Facades: Experimental Investigation on Narrow-Cavity Design".	مدیترانه‌ای	استفاده از مصالح متنوع	مطالعه رفتار سیال	با استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا در پوسته خارجی نمای تهویه شده با درز باز، تهویه بهتر انجام می‌شود.
Seferis, et al., "Investigation of the Performance of a Ventilated Wall".	معتدل	عایق‌های متنوع در حفره و لایه خارجی	انتقال حرارت	استفاده از عایق تابشی نظیر آلومینیوم بین لایه خارجی و محفظه هوا باعث گرم ماندن جریان هوا در محفظه در زمستان، مخصوصاً شب و خنک ماندن آن در تابستان می‌شود.
Goulart, et al., "Thermal Performance of Opaque Ventilated Facades: A Systematic Review".	-	-	-	این مقاله مروری بر تحقیقاتی است که تمرکزشان بیشتر در قاره اروپا، به‌ویژه اسپانیا، ایتالیا و پرتغال است، و بنابراین آب‌وهوای مدیترانه‌ای را مورد توجه قرار داده‌اند. تنها دو مطالعه از برزیل یافت شد. روش‌های تحلیل در مقالات متفاوت بودند، بیشتر مقالات از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کرده‌اند ولی مقالاتی که از نرم‌افزار ترنسپس استفاده کرده‌اند، اعتبار بیشتری دارند.
Soudian, et al., "Parametric Optimization of Multifunctional Integrated Climate-Responsive Opaque and Ventilated Façades Using CFD Simulations".	سرد	جریان هوا و درجه حرارت	بار حرارتی	این مطالعه نشان داد که مقاومت حرارتی در نمای ساختمان می‌تواند عملکرد حرارتی نمای ساختمان را افزایش یا کاهش دهد، و همچنین می‌تواند راه‌حلی باشد تا جذب و فقدان حرارت در نمای ساختمان را به‌صورت سالانه ممکن کند.

26. V.M. Soto Francés, et al., "Modeling of Ventilated Façades for Energy Building Simulation Software", *Energy and Buildings*, 65 (2013): 419.
27. V. Serra, et al., "Experimental Evaluation of a Climate Façade: Energy Efficiency and Thermal Comfort Performance", *Energy and Buildings*, 42(1) (2010): 53.
28. M.J. Suárez, et al., "Energy Evaluation of an Horizontal Open Joint Ventilated Façade", In *Applied Thermal Engineering*, 2012, 310.
29. ESP-r

ت ۲. چارچوب کلی فرایند تحقیق.

میزان تأثیر درزهای باز بر عملکرد حرارتی نماهای تهویه شده را سنجیده‌اند. در آن تحقیق، نمای ساختمان‌هایی به ارتفاع ۲/۴۸ متر که دارای ۴ پنل به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر و ۵ درز باز در شهر تهران و یزد بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از این نما در تابستان و در شهرهای تهران و یزد، منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود. در این مطالعات صرفاً عملکرد نماهای تهویه شده با درز باز در قیاس با درز بسته در فصول سرد و گرم بررسی شده و تحقیقی در مورد میزان سطح این نوع نما نسبت به نمای اصلی، ضخامت محفظه هوا، و جانمایی ارتفاعی این نوع نما برای دستیابی به بهینه‌سازی جریان هوا و انتقال حرارت انجام نشده است. در مقاله حاضر به این سه عامل پرداخته می‌شود.

۲. روش تحقیق

این پژوهش با ماهیت کاربردی و به صورت کمی و با استفاده از روش شبیه‌سازی انجام گرفته است. در مرحله اول، مدل پایه برای ساختمان اداری و متعارف دولتی به دست آمد. در مرحله دوم، متغیرهای مستقل نظیر سطح پوشاندگی نمای تهویه شده با درز باز نسبت به نمای معمولی، جانمایی از نظر ارتفاعی در

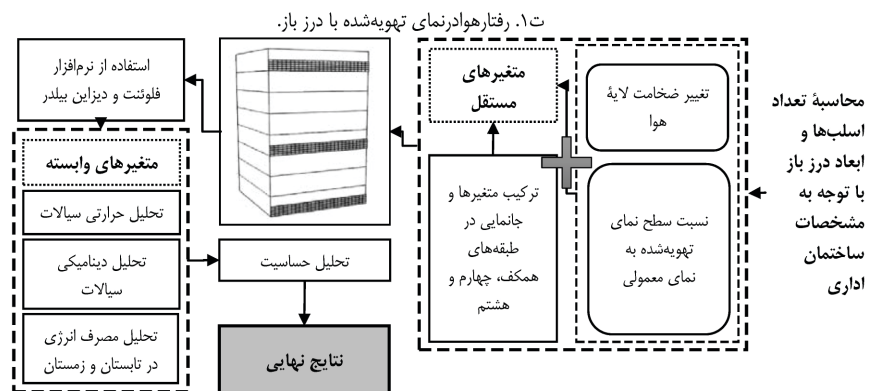
نمای مدل پایه و تغییر ضخامت محفظه هوا بین دو لایه روی مدل پایه در بازه‌های مشخص و در دو تاریخ انقلاب تابستانی و انقلاب زمستانی^{۳۳} تعریف و دست‌کاری شد. در مرحله سوم، انتقال حرارت، سرعت، دما، و میزان مصرف انرژی با کمک شبیه‌سازی سناریوهای مرحله دوم به دست آمد. و در مرحله آخر، شرایط مطلوب برای نما با عملکرد بهینه بررسی شد (ت ۲). مصرف انرژی در تابستان و زمستان در نرم‌افزار دیزاین بیلدر^{۳۴} به دست آمد و متغیر وابسته قلمداد و در کنار میزان انتقال حرارت، سرعت، و دمای سیال بررسی شد.

۳. متغیرهای پژوهش

متغیرها در این مقاله به دو نوع متغیر مستقل و وابسته تقسیم می‌شوند: متغیرهای مستقل شامل ضخامت لایه هوا، که در شهر اصفهان شامل مقادیر ۴ و ۶ سانتی‌متر است؛ میزان و درصد پوشاندگی سطح توسط نماهای تهویه شده در جبهه جنوب؛ و طبقات ساختمانی مورد بررسی به منظور دستیابی به بهترین نتیجه در راستای تعمیم به کل ساختمان (بررسی شبیه‌سازی‌ها در طبقات همکف، چهارم، و هشتم مدل پایه) است و متغیرهای وابسته نیز شامل انتقال حرارت؛ سرعت جریان هوا در فضای مابین؛ دمای سطح داخلی نما؛ و میزان مصرف انرژی است.

۴. پژوهش در نمونه موردی (محیط پژوهش)

وضعیت اقلیمی شهر اصفهان در نتایج این پژوهش مؤثر است، پس به شرح مختصری از وضعیت اقلیمی این شهر پرداخته می‌شود: اصفهان در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی در مرکز کشور ایران قرار دارد.^{۳۵} شهر اصفهان بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن دارای اقلیم سرد و خشک است. بر اساس بررسی‌های بلندمدت آماری^{۳۶}،



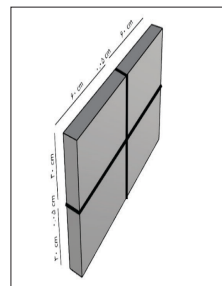
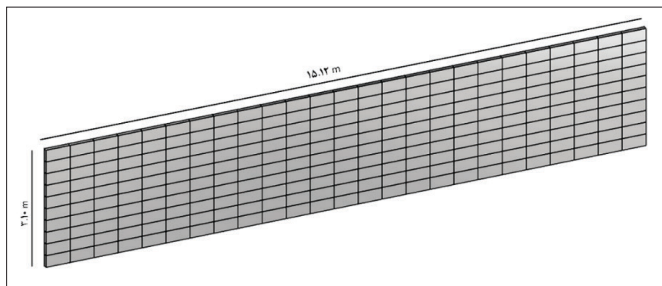
فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی و پنجم، زمستان ۱۴۰۴، شماره ۴، پیاپی ۱۱۱
 بررسی جریان هوا و انتقال حرارت در نمای تهویه شده با درز باز؛ مطالعه موردی: ساختمان اداری شهر اصفهان: نجمه ملکی‌پور، نرگس دهقان

30. S. Fantucci, et al., "Thermal Performance Assessment of an Opaque Ventilated Façade in the Summer Period: Calibration of a Simulation Model through in-field Measurements", *Energy Procedia*, 111 (2017): 620.

31. M.F. Goulart and L.C. Labaki, "Thermal Performance of Opaque Ventilated Facades: A Systematic Review", *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 13(00) (2022): e022026.

ت ۳ (راست). ابعاد سرامیک انتخابی برای نما (در این حالت ۴ سرامیک نما با درز ۵ میلی‌متر به هم متصل هستند). تدوین: نگارندگان.

ت ۴ (چپ). دیوار نهایی برای نمای تهویه‌شده با درز باز، تدوین: نگارندگان.



به تعداد ۱۰ عدد ثابت فرض شد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه ارتفاع مجاز ساختمان اداری بین ۲/۸ تا ۳/۲ متر متغیر است، پس نیازمند وجود تایل‌هایی است که با ۱۰ ردیف و با احتساب ۵ میلی‌متر فاصله بین هر تایل، دارای ارتفاعی در بازه مذکور باشند. پس از بررسی سرامیک‌های کارخانه‌ای، از آنجاکه ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاعی مرسوم است، سرامیک‌هایی با همین ارتفاع در ده ردیف با ۵ میلی‌متر فاصله، بهترین حالت ممکن ارتفاعی برای مدل پایه اداری، یعنی ارتفاع ۳/۱۰ را ایجاد کرده‌اند. طول هر سرامیک دوبرابر عرض آن یعنی ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت آن ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (ت ۳). معیار برای رسیدن به ابعاد مدل پایه، از نشریه ۱۷۸ و گروه شغلی ۵ (رئیس‌ان گروه)^{۳۹} استفاده شد که بر مبنای آن، می‌بایست در فضای اداری باز مستقر شوند و سرانه بازای تعداد نفرات ۷/۵ متر مربع است. این فضا برای ۳۰ نفر در نظر گرفته شد؛ برای مدلی با سطح مربعی، به ضلع ۱۵ متر. برای همخوانی با طول سرامیک و درز باز بین صفحات، طول مدل پایه ۱۵/۱۲ متر (شامل ۲۵ ستون ۶۰ سانتی‌متری به همراه ۲۴ درز باز ۵ میلی‌متری) در نظر گرفته شد. ارتفاع مدل پایه نیز ۳/۱۰ متر (شامل ۱۰ ردیف سرامیک ۳۰ سانتی‌متری و ۹ درز باز ۵ میلی‌متری) است (ت ۴).

پس از انتخاب مدل پایه، سطح نما به صورت بازه ۲۰ درصدی تقسیم‌بندی و با پوشش سرامیک و با چیدمان با

میانگین سالانه دمای ایستگاه اصفهان $16/4^{\circ}\text{C}$ است. میانگین دما در سردترین ماه سال در ژانویه 3°C و در گرم‌ترین ماه سال یعنی جولای $29/5^{\circ}\text{C}$ است. میانگین سالانه سرعت باد غالب در اصفهان $2/5\text{ m/s}$ است. جهت وزش بادهای غالب در ایستگاه اصفهان در همه فصول سال، غیراز تابستان، غربی و در فصل تابستان شرقی است. میانگین ماهانه رطوبت نسبی هوا طبق آمار بلندمدت در ایستگاه اصفهان $28/7\%$ است. میانگین حداقل رطوبت نسبی تقریباً 23% و میانگین حداکثر آن $57/6\%$ است.^{۳۷}

علاوه بر اقلیم شهر اصفهان، در جایگاه محیط پژوهش، ساختمان‌های اداری و دولتی شهر اصفهان نیز محیط پژوهش این مقاله محسوب می‌شوند. برای دستیابی به یک نمونه مدل پایه برای شبیه‌سازی، ساختمان‌های متعارف اداری و دولتی که به ضوابط طراحی^{۳۸} نزدیک‌تر باشند، مدنظر هستند. ساختمان‌های متعارف اداری و دولتی در اصفهان، معمولاً دارای ۸ طبقه و ارتفاع $26/7$ متر هستند. در این پژوهش نیز، تعداد طبقات ساختمان اداری ۸ طبقه در نظر گرفته شد.

۴.۱. ابعاد و ویژگی‌های مدل پایه ساختمان

از آنجاکه پوشش لایه خارجی نمای تهویه‌شده با درز باز در این مقاله (در شهر اصفهان)، صفحه‌هایی از جنس سرامیک با درز باز است که بر روی نمای اصلی قرار گیرند، ابتدا برای انتخاب ابعاد مدل اصلی، به بررسی ابعاد انواع مختلف سرامیک‌ها پرداخته شد. سرامیک‌های نما در کارخانه‌های مطرح دارای ابعاد مختلفی هستند که تنها به بررسی چند کارخانه (الوند، پاسارگاد، تبریز، مرجان، و مهسرام) اکتفا شد. ابعاد سرامیک‌ها، هنگامی که کنار هم قرار گیرند، بررسی شد. هدف بررسی سطح نمای تهویه‌شده با درز باز به صورت درصدی از نمای معمولی است و از این‌رو، تعداد ردیف سرامیک‌ها بر روی نما،

۲.۴. تعداد سناریوها و روش محاسبه

در این پژوهش، تأثیر میزان پوشاندگی نما با درز باز بر نمای اصلی ساختمان بررسی شده است. به این صورت که در قالب ۶ حالت گوناگون انتخابی، پوشاندگی سطح نما به صورت درصدی بررسی شود. این درصدها شامل ۰٪، ۱۰٪، ۱۰۰٪ از سطح نمای اصلی با گام‌های ۲۰ تایی است (به دلیل نزدیکی بسیار زیاد نتایج شبیه‌سازی‌ها در متغیرهای با فاصله ۱۰٪، فاصله متغیرها ۲۰٪ در نظر گرفته شد).

به منظور نتیجه‌گیری بهتر، مدل پایه در سه ارتفاع مختلف بررسی گردید. این امر صرفاً به دلیل متغیر بودن نتایج شبیه‌سازی‌ها در سه طبقه مختلف ساختمان است؛ چراکه در ارتفاعات مختلف، فشار هوا، دمای هوا، و نوع تابش خورشید با هم متفاوت است. پس مدل در سه طبقه یعنی طبقه همکف ساختمان (که از یک سمت در ارتباط با زمین و از سمت دیگر در ارتباط با یک فضای کنترل شده است)، طبقه چهارم (یکی از طبقات میانی ساختمان)، و طبقه آخر ساختمان (از یک سمت در ارتباط با هوا و از سمت دیگر در ارتباط با فضای کنترل شده) مطالعه شد. با این کار تعداد موارد شبیه‌سازی شده به ۳۶ عدد

درز باز، نما پوشانده شد. به این صورت که بار اول نمای ساده و بدون لایه دوم بررسی شود. در حالت دوم، تنها ۲۰٪ سطح نما، به نمای دولایه اختصاص داده شود. در حالت سوم، ۴۰٪ و به همین ترتیب ادامه یابد تا سطح نما با لایه دوم کاملاً پوشیده شود. تکمیل لایه دوم بر اساس درصد از پایین به بالای نما تکمیل می‌شود (جدول ۳). علت این نوع پوشیدگی در دو چیز است: یک، ضرورت وجود بازشو در فضاها در جبهه جنوبی ساختمان که اداری است. دوم، در انتخاب نوع چیدمان صفحات در این پژوهش که صرفاً منافذ افقی بررسی شده است. چیدمان دیگری در نما، مثلاً بر اساس خطوط عمودی در نما، نظم‌رایی در نما را تغییر می‌دهد.

دیوار خارجی معمولی نما از یک لایه پلاستر گچ، سفال، عایق حرارتی، و آجر تشکیل شده و دارای ضخامت کلی ۲۶ سانتی‌متر است. دیوار خارجی که دارای نمای تهویه شده با درز باز است، شامل صفحات سرامیکی، لایه هوا، عایق حرارتی، بلوک سفالی، و یک لایه پلاستر گچ است. در «جدول ۴ و ۵» و «ت ۵» ضخامت و ویژگی‌های حرارتی دیوارها و مشخصات بنای اداری در نرم‌افزار به ترتیب آورده شده است.

۳۲. محمدجواد ثقفی و ناهید توسلی، «بررسی تأثیر لایه هوای تهویه شده در نماهای نوین با درز باز بر عملکرد حرارتی ساختمان»، ۵-۱۴.

۳۳. انقلاب تابستانی: ۲۱ ژوئن / ۳۱ خرداد. انقلاب زمستانی: ۲۱ دسامبر / ۳۰ آذر

34. Designbuilder - Heating design - Cooling design

۳۵. فاطمه السادات مجیدی و دیگران، «تفاوت فصلی حدود آسایش حرارتی در محلات قدیم و جدید شهر اصفهان؛ مطالعه موردی: محلات جلفا و مرداویج»، هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، دوره ۲۳، ش. ۲ (شهریور ۱۳۹۷): ۳۱-۴۲.

۳۶. ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۵

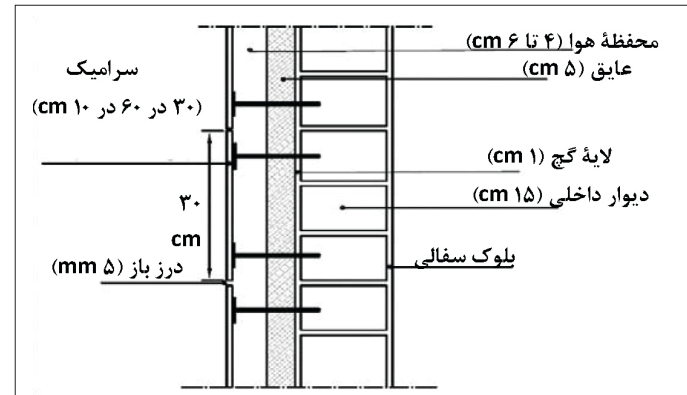
۳۷. غزاله چهارازی، «تعیین محدوده آسایش حرارتی در فضای باز دبستان‌های دخترانه شهر اصفهان»، صفه، دوره ۳۱، ش. ۳ (پاییز ۱۴۰۰): ۴۳-۵۸.

جدول ۳. نحوه پوشش درصدهای مختلف نمای مد نظر به نمای معمولی در جبهه جنوبی، تدوین: نگارندگان.

درصد نمای تهویه شده با درز باز	شکل	درصد نمای تهویه شده با درز باز	شکل
۰٪		۶۰٪	
۲۰٪		۸۰٪	
۴۰٪		۱۰۰٪	

۳۸. سازمان برنامه و بودجه ایران
- دفتر امور فنی، آیین‌نامه طراحی
ساختمان‌های اداری (نشریه شماره
۱۷۸) (تهران: سازمان برنامه و بودجه،
۱۳۷۷)، ۲۲.
۳۹. همان

عنوان	مشخصات
نوع کاربری	اداری
موقعیت	اصفهان
مساحت زیربنا (متر مربع)	۲۲۸
تعداد طبقات	۸
ارتفاع هر طبقه (متر)	۳/۱۰
ظرفیت اشغال (نفر بر متر مربع)	۷ (استاندارد اشری)
ساعت کار اداری	۸ صبح الی ۱۶
جهت‌گیری	شمالی - جنوبی
روشنایی (لوکس)	۴۰۰



رسید (جدول ۶). درنهایت همه سناریوها در گرم‌ترین روز و سردترین روز سال (انقلاب زمستانی و تابستانی) بررسی شد. با توجه به اینکه ضلع جنوبی ساختمان بیشترین تابش خورشیدی را دریافت می‌کند، در این پژوهش به بررسی نما در آن ضلع پرداخته شده است.

۳.۴. نرم‌افزار شبیه‌سازی

روش‌های متفاوتی معمولاً برای مدل‌سازی نماهای تهویه‌شده صورت می‌گیرد. در این میان مطالعاتی که با روش محاسبه دینامیکی سیالات (CFD) انجام شده است، همگی نشان از قابلیت بالای و اطمینان بالا به این تکنیک را نشان می‌دهد. ۴۰ از این‌رو، جریان‌های هوای ورودی و خروجی از طریق درزها در طول نما، استفاده از روش یادشده را اجباری می‌کند. در این تحقیق، برای تحلیل پدیده گرمایی و دینامیک سیالات اتفاق افتاده در نماهای تهویه‌شده با درز باز، از نسخه 1R

اجزای کالبدی	لایه تشکیل‌دهنده	ضخامت لایه (mm)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.°k)
دیوار خارجی معمولی	آجر	۱۰۰	۰/۳۵
	عایق پلی استایرن	۵۰	
	بلوک سفالی	۱۰۰	
	پلاستر گچ	۱۰	
دیوار خارجی با نمای تهویه‌شده	سرامیک	۱۰	۰/۳۸
	لایه هوا	متغیر در نظر گرفته شده (۶۴)	-
	عایق پلی استایرن	۵۰	۱/۲۸
	بلوک سفالی	۱۵۰	۰/۳
	پلاستر گچ	۱۰	۰/۱۷
پشت‌بام	آسفالت	۱۰	۰/۴۷
	صفحه فیبربرد	۱۰	
	عایق پلی استایرن	۴۰	
	بتن	۱۰	
	پلاستر گچ	۱۵	
سقف داخلی طبقات	پوشش کف	۵۰	۱/۴
	بتن	۱۵۰	
	عایق استاندارد	۳۰	
	تایل سقف	۱۰	

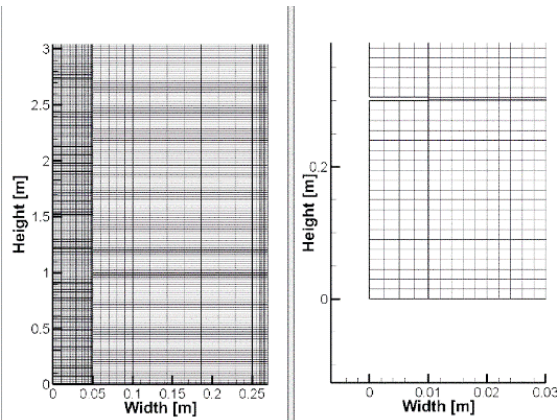
متغیرهای مستقل	بازه	تعداد حالات	تعداد جای گشت
درصد سطح نمای تهویه‌شده با درز باز به دیوار	از ۰ تا ۱۰۰٪ با گام ۲۰٪	۶	$۳۶ = ۶ \times ۳ \times ۲$
ارتفاع نمای تهویه‌شده با درز باز	طبقه همکف، چهارم، و هشتم	۳	
ضخامت حفره	۴ و ۶ سانتی‌متر	۲	

ت ۶ (بالا). شبکه مشبندی در نرم‌افزار فلوئنت.

ت ۷ (پایین، راست). درجه حرارت در محفظه هوا در دو حالت تجربی و رایانه‌ای در ارتفاعات متفاوت سنسور حرارتی، مأخذ:

Sánchez, et al., "Experimental Validation of a Numerical Model of a Ventilated Façade with Horizontal and Vertical Open Joints".

ت ۸ (پایین، چپ). قیاس سرعت عمودی هوا در محفظه میانی در دو حالت تجربی و رایانه‌ای در موقعیت‌های متفاوت عمودی و افقی سنسور، مأخذ: Ibid.

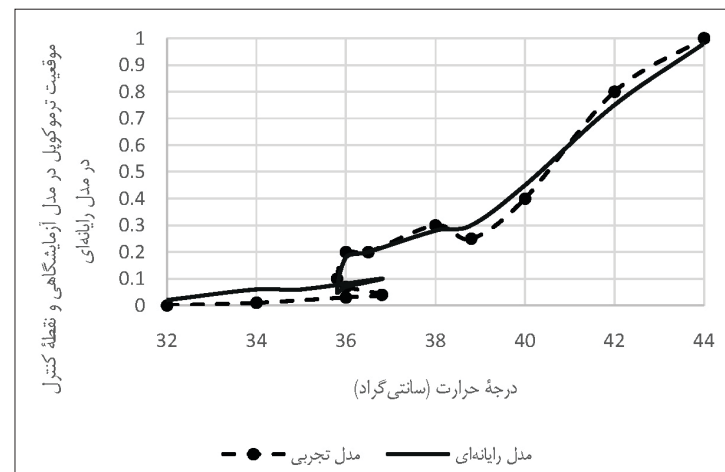
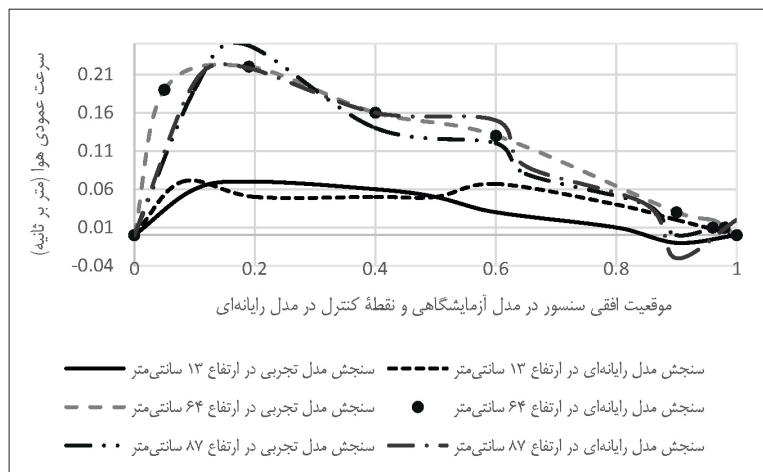


۲۰۲۱ نرم‌افزار فلوئنت^{۴۱} نیز که امکان مطالعه و بررسی دقیق رفتار سیال در حرکت را فراهم می‌کند، استفاده شده است. در اینجا نرم‌افزار یادشده برای شبیه‌سازی مدل طراحی‌شده نیز به کار می‌آید. در این نرم‌افزار شبیه‌سازی از طریق شبکه مشبندی صورت می‌گیرد. مش‌ها المان‌های مربعی هستند و به دلیل پیچیدگی زیاد، به صورت دوبعدی بررسی شده است (ت ۶). برای ساده‌سازی مراحل شبیه‌سازی، سازه باربر در نظر گرفته نشده و مصالح مورد استفاده نیز کدر است. برای محاسبه

مصرف انرژی نیز از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر با ورژن ۷.۰.۲۰۰۶، که با موتور انرژی پلاس با ورژن ۹.۴.۰۰۰۲ محاسبات را انجام می‌دهد، استفاده شد.

۴.۴. قیاس داده‌های عددی با تجربی و اعتبارسنجی آن

مانز و همکاران^{۴۲} برای مدل‌سازی نماهای دوپوسته شیشه‌ای با پنل میانی تهویه‌شده سایه‌انداز، نتایج شبیه‌سازی‌شده همرفت، رسانش، و تشعشع را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. برخی نویسندگان با روش‌های مکانیک سیالات، نتایج عددی را با استفاده از داده‌های تجربی تأیید کردند.^{۴۳} با نرم‌افزار فلوئنت معادلات ناویر استوکس^{۴۴} (از جمله معادله بقای انرژی) با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شود. جزئیات گسسته‌سازی معادلات و روش‌های حل را می‌توان در مستندات نرم‌افزار یافت.^{۴۵} در این نرم‌افزار اثرات آشفتگی با استفاده از میانگین رینولدز (RANS)، با مدل آشفتگی K-e (RNG) انجام می‌شود.^{۴۶} روش چن در ادبیات تحقیقات با عنوان روشی توافقی بین دقت و زمان حل توصیه شده است،^{۴۷} و به‌طور گسترده‌ای



کمک تحلیل حساسیت متغیرهای مستقل، به نحوه تأثیرگذاری هریک از این متغیرها بر متغیرهای وابسته پرداخته شد. یافته‌ها و نتایج این پژوهش با توجه به بلوک انتخابی پایه، برای کاربری اداری و شرايطی که دیوارها دوپوسته و غیرشفاف و بدون مجاورت و همسایگی باشند، معتبر هستند.

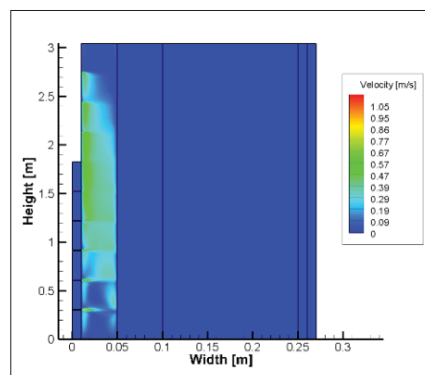
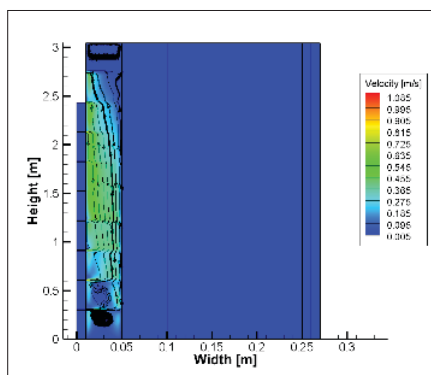
سرعت جریان هوا در فضای مابین: طبق استاندارد جهانی اشری^{۴۳}، در صورتی که جریان هوا در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ m/s باشد، عملکرد تهویه طبیعی بهترین است. در نمای تهویه شده با درز باز، جریان هوا، حرکتی کاملاً بالارونده دارد. طبق تحلیل‌های تصویری و عددی دینامیک سیالات، هوا با سرعت زیاد و به صورت یکنواخت، حرکتی رو به بالا دارد (ت ۹ و ۱۰). در طبقه چهارم، سرعت جابه‌جایی هوا در همه سطوح و ضخامت لایه هوا حتی از طبقه آخر (در حالت ۶۰٪ سطح نما و ضخامت لایه ۴ سانتی‌متر در طبقه چهارم ۰/۸۰ و در طبقه آخر ۰/۶۶ m/s است) نیز بیشتر است (جدول ۶). اما با افزایش سطح صفحات، سرعت ورود و جابه‌جایی هوا در محفظه بیشتر شده است (متوسط سرعت جریان هوا در سطح صد و صفر٪ به ترتیب ۰/۷ و ۰/۵۶ m/s است (جدول ۶). این امر کمک می‌کند در تابستان، طبقات میانی ساختمان بیشترین

برای جریان‌های کانال (نماهای تهویه شده) در کارهای اخیر^{۴۸} تأیید شده است. علاوه بر این، برای اعتبارسنجی داده‌ها، از داده‌های تجربی مقاله سنجر و همکاران^{۴۹} استفاده شد و مدل تجربی این مقاله در نرم‌افزار فلوئنت 1R 2021 شبیه‌سازی شد (ت ۷). این مدل نشان می‌دهد که درجه حرارت در محفظه هوا در محل قرارگیری سنسورهای حرارتی با درجه حرارت نقاط کنترل در نرم‌افزار نزدیک است. مدل رایانه‌ای نسبت به مدل تجربی خطی و صعودی است و کمی پایین‌تر از نصف ارتفاع محفظه هوا دارای افزایش دمای ۲ °C است. همچنین آنها نشان دادند که سرعت عمودی هوا در محفظه هوا در حالت‌های متفاوت ارتفاعی سنسورهای سرعت‌سنج با سرعت هوا در مدل رایانه‌ای شباهت بسیاری دارد (ت ۸). سرعت هوا در مدل تجربی و رایانه‌ای در میانه محفظه هوا دارای مقادیر بسیار نزدیک است. سرعت عمودی هوا در مدل رایانه‌ای در انتهای پایینی محفظه هوا و نزدیک به پوسته داخلی دو برابر مدل تجربی ولی سرعت هوا در مدل تجربی روی سطح پوسته داخلی منفی و به سمت پایین است.

۵. یافته‌های تحقیق

۵.۱. تحلیل‌های تصویری، نمودارها، و جداول

در این بخش تحلیل‌های تصویری، نمودارها، و جداول حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای متفاوت از جانمایی نمای تهویه شده با درز باز عرضه می‌شوند. تحلیل‌ها در طبقات همکف، چهارم، و هشتم (آخر) در گرم‌ترین و سردترین روز سال در شهر اصفهان صورت گرفته است. این تحلیل‌ها منتج از نرم‌افزار فلوئنت^{۵۰} و تحلیل CFD هستند که در قالب تحلیل‌های دینامیکی سیالات شامل سرعت جابه‌جایی هوا^{۵۱} (V)، دمای هوا^{۵۲} (T)، و انتقال حرارت است. سپس مصرف انرژی این سناریوها با کمک نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، در فصل تابستان و زمستان بررسی و با



40. Fantucci, et al., "Thermal Performance Assessment of an Opaque Ventilated Façade in the Summer Period: Calibration of a Simulation Model through in-field Measurements", 625.
41. Fluent

ت ۹ (راست). انقلاب تابستانی، با سطح پوشش ۶۰٪، تدوین: نگارندگان.

ت ۱۰ (چپ). انقلاب تابستانی، میزان پوشاندگی ۸۰٪، تدوین: نگارندگان.

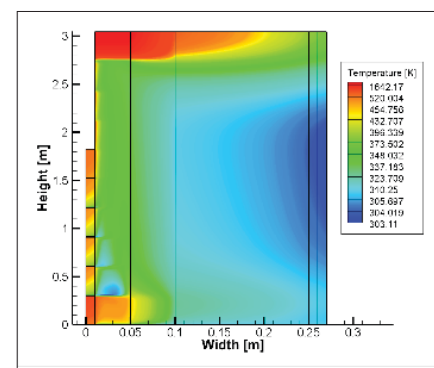
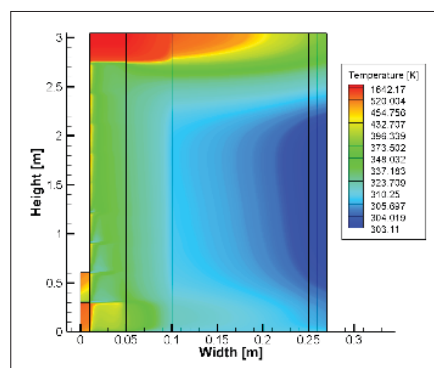
42. Q. Chen, "Comparison of Different k-ε Models for Indoor Air Flow Computations", *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28(3) (1995): 358.

ت ۱۱ (راست). انقلاب تابستانی با پوشش ۶۰٪، تدوین: نگارندگان.

ت ۱۲ (چپ). انقلاب تابستانی با پوشش ۲۰٪، تدوین: نگارندگان.

تبادل حرارتی با فضای بیرون را داشته باشند. نکته مهم دیگر اینکه، عملکرد مطلوب نما، با افزایش سرعت جریان هوا نسبت مستقیم دارد و در نماهایی با میزان سطح بیشتر، سرعت جریان هوا بالاتر، پس عملکرد نما مطلوب‌تر است.

دمای هوای پوسته داخلی نما: محدوده دمای آسایش در بازه ۱۵ تا ۲۵ °C قرار دارد.^۴ دمای سطح داخلی نما با افزایش سطح نمای تهویه شده و افزایش ضخامت لایه هوا از ۴ به ۶ سانتی متر، کمتر می شود و نما عملکرد مطلوب تری را بروز می دهد (ت ۱۱). متوسط دمای سطح داخلی نما در سطح ۲۰ و ۱۰۰٪ و با ضخامت لایه هوای ۴ سانتی متر، به ترتیب ۴۰ و ۳۸/۶ °C است. همچنین دمای سطح داخلی در همین سطح در ضخامت لایه هوای ۶ سانتی متر، در حالت ۲۰ (ت ۱۲) و ۱۰۰٪، به ترتیب ۳۹/۳ و ۳۸/۴ سانتی متر است که در قیاس با حالت قبل، دما روند کاهشی داشته است. همچنین دمای سطح داخلی نما، با افزایش ارتفاع طبقه و مجدداً با افزایش ضخامت لایه هوا از ۴ به ۶ سانتی متر، از همکف به طبقه هشتم کاهش می یابد که این میزان برای طبقه همکف و هشتم با ضخامت لایه هوای ۴ سانتی متر به ترتیب ۴۰/۱ و ۳۸/۷ °C است. همین میزان برای ضخامت لایه هوای ۶ سانتی متر، به ترتیب ۳۹/۸



و ۳۸/۵ °C است که هم نشان دهنده روند کاهشی دما در بالا رفتن طبقات، و هم سطح و عملکرد مطلوب نما در ضخامت لایه هوای ۶ سانتی متر نسبت به ۴ سانتی متر است (جدول ۶).

بررسی شار حرارتی جریان هوا: برای بررسی عملکرد حرارتی، بهترین معیار مقایسه میزان انتقال حرارت عبوری از دیوار است. به این منظور، این میزان بر اساس ارتفاع ساختمان و ضخامت لایه هوا، در دو انقلاب زمستانی و تابستانی و با توجه به خروجی های نمودار فلونت بررسی شده است (جدول ۶). در تابستان با بالا رفتن انتقال حرارت، باید انرژی بیشتری صرف شود تا دمای داخل به دمای آسایش برسد. در انقلاب زمستانی، انتقال حرارت بسیار کم است که این بدان معناست که گرما از داخل به خارج انتقال می یابد. در این زمان، عملکرد نمای تهویه شونده با درز باز کاهش می یابد. با افزایش ارتفاع ساختمان نیز، عملکرد نما مطلوب تر می شود. این وضعیت در میزان پوشش های بیشتر صفحه ها تأثیر بیشتری دارد. در مورد ضخامت نیز، در انقلاب تابستانی، میزان انتقال حرارت در ضخامت ۶ سانتی متر کمتر است. این حالت نشان می دهد که نما کارایی مطلوبی دارد و گرما را از ساختمان خارج می کند. اما در مورد ضخامت ۴ سانتی متر، انتقال حرارت بیشتر است و این امر سبب می شود، انرژی بیشتری برای دستیابی به آسایش حرارتی صرف شود. با توجه به انتقال حرارت، مطلوب ترین شرایط زمانی است که مدل مد نظر در تابستان کمترین و در زمستان بیشترین میزان انتقال حرارت را داشته باشد. این شرایط فقط در دو حالت دیده می شود ابتدا، مدل با پوشش ۶۰٪ و ضخامت هوای ۶ سانتی متر در طبقه چهارم در انقلاب زمستانی میزان ۲۲/۹۱ w/m² را گرما جذب می کند، در صورتی که همین مدل در تابستان ۲۲/۱۱ w/m² یعنی کمتر یا تقریباً برابر با زمستان، گرما جذب می کند. مدل بعدی که شرایط مطلوبی را

43. N. Safer, et al., "Three-dimensional Simulation with a CFD Tool of the Airflow Phenomena in Single Floor Double-skin Facade Equipped with a Venetian Blind", *Solar Energy*, 79(2) (2005): 197; M. Coussirat, et al., "Performance and Influence of Numerical Sub-models on the CFD Simulation of Free and Forced Convection in Double-glazed Ventilated Façades", *Energy and Buildings*, 40(10) (2008): 1781-1789; G. Baldinelli, "Double Skin Façades for Warm Climate Regions: Analysis of a Solution with an Integrated Movable Shading System", *Building and Environment*, 44(6) (2009): 1107; R. Fuliotto, et al "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Façade", *Energy and Buildings*, 42(1) (2010): 23-28.

44. Navier-Stokes

ت ۱۳. میزان مصرف انرژی در طبقات (همکف، چهارم، و هشتم) با ضخامت لایه هوا (۴ و ۶ سانتی متر) و با سطح متفاوت نمای تهویه شده، تدوین: نگارندگان.

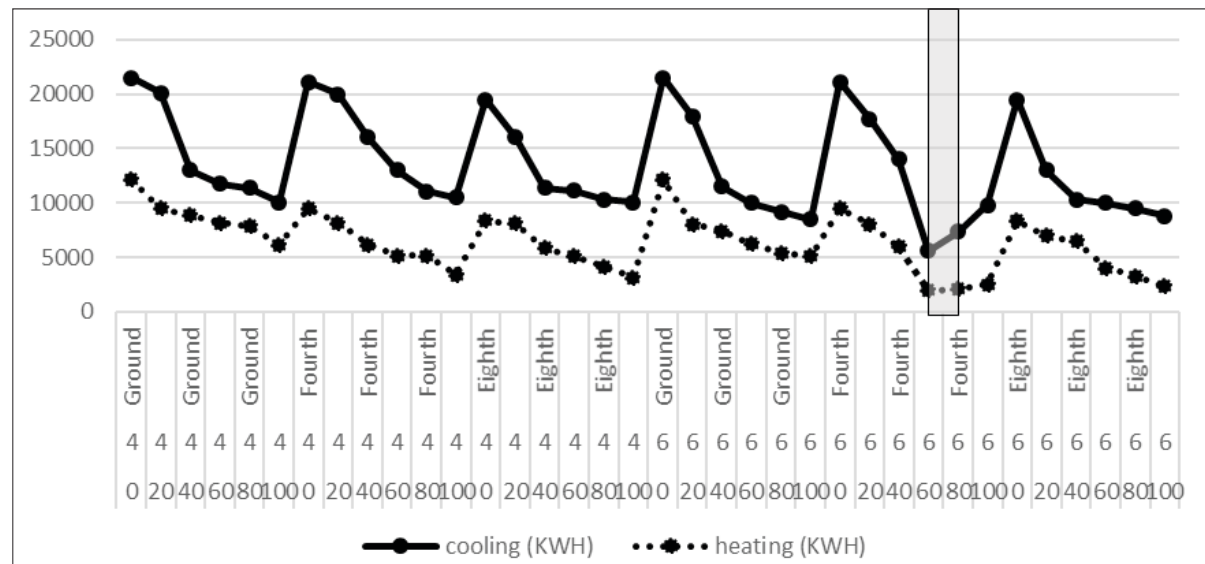
بیشتر است. مصرف انرژی در طبقات، طبق الگوی تقریباً مشابهی، با کمک این نوع نما از طبقه همکف به هشتم روند کاهشی دارد. همچنین میزان مصرف انرژی با افزایش سطح این نوع نما تا بیش از ۲۰٪ کاهش می‌یابد. همان‌طور که در «جدول ۶» و «ت ۱۳» مشخص است، الگو با سطح ۶۰ و ۸۰٪ از نمای تهویه شده در طبقه چهارم و با ضخامت لایه هوا ۶ سانتی متر، در تابستان و زمستان، کمترین مصرف انرژی را نسبت به الگوهای مشابه خود دارد. مصرف انرژی در سطح ۶۰٪ و در طبقه چهارم و در ضخامت لایه هوا ۶ سانتی متر، ۴۱٪ مصرف نسبت به ضخامت لایه هوا ۴ سانتی متر است. این میزان برای سطح ۸۰٪، ۵۷٪ است. که خود نشان‌دهنده شرایط مطلوب‌تر عملکرد نما در سطح نمای ۶۰ نسبت به ۸۰٪ و ضخامت لایه هوا ۶ نسبت به ۴ سانتی متر است.

۲.۵. تحلیل حساسیت

ضخامت لایه هوا بین دو پوسته: با ثابت ماندن سایر متغیرهای

دارد، دارای پوشش ۸۰٪ و ضخامت هوای ۶ سانتی متر و واقع در طبقه چهارم است که با شارحرارتی صفر w/m^2 ، گرمایی را در زمستان و در تابستان جذب نمی‌کند. در نتیجه بهترین عملکرد حرارتی و جریان هوا را این دو مدل دارند.

بررسی مصرف انرژی: محاسبه مصرف انرژی سناریوهای حاصل در نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر انجام شد. برای محاسبه دقیق‌تر به جای محاسبه سالیانه، مصرف انرژی بر اساس مصرف در تابستان با تأکید بر مصرف انرژی الکتریسیته و در زمستان با تأکید بر مصرف گاز طبیعی برآورد شد. متوسط مصرف انرژی در تابستان تقریباً دوبرابر زمستان است. مصرف انرژی در حالتی که سطح پوشش نما صفر٪ است، نسبت به حالتی که این پوشش ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ است، به ترتیب ۱۰۷، ۱۵۰، ۱۶۹، ۱۸۴ و ۲۱۴٪ بیشتر است. همچنین مصرف انرژی برای نمای صفر٪ در طبقه همکف و هشتم نسبت به متوسط مصرف انرژی در همه سطوح نمای تهویه شده، به ترتیب ۱۵۷ و ۱۶۳٪



درصد پوشاندگی						زمان شبیه‌سازی	ارتفاع	ضخامت لایه هوا	سرعت جریان هوا در محفظه مابین (m/s)		
۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰	۰						
۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۳۷	۰/۳۳	سالیانه	همکف	۴ (سانتی‌متر)			
۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۸	۰/۷۲	۰/۷۷		چهارم				
۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۵۸		هشتم				
۰/۶۸	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۵۰	۰/۳۳	سالیانه	همکف	۶ (سانتی‌متر)			
۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۷۷		چهارم				
۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۶۲	۰/۵۸		هشتم				
۳۹	۳۹/۳	۳۹/۶	۴۰/۷	۴۱/۲	۴۱	سالیانه	همکف	۴ (سانتی‌متر)	دمای سطح پوسته داخلی (°C)		
۳۸/۶	۳۹	۳۹/۵	۳۹/۵	۳۹/۸	۴۰		چهارم				
۳۸/۳	۳۸/۵	۳۸/۸	۳۸/۵	۳۹/۱	۳۹/۳		هشتم				
۳۹	۳۹/۳	۳۹/۵	۴۰/۱	۴۰/۲	۴۱	سالیانه	همکف	۶ (سانتی‌متر)			
۳۸/۳	۳۸/۵	۳۸/۸	۳۹/۲	۳۹/۲	۴۰		چهارم				
۳۸	۳۸/۲	۳۸/۵	۳۸/۴	۳۸/۷	۳۹/۳		هشتم				
۶۳/۵	۷۲/۴	۷۳/۴	۷۳/۹	۶۸/۹	۷۸/۳	تابستان	همکف	انتقال حرارت (w/m2)			
۱۳/۰	۲۱/۸	۲۲/۸	۲۳/۱	۲۳/۸	۲۲/۸	زمستان	چهارم		۴ (سانتی‌متر)		
۵۹/۶	۵۶/۲	۵۳/۵	۶۶/۹	۶۶/۷	۶۶/۸	تابستان					
۱۳/۶	۱۷/۸	۱۰/۴	۱۵/۴	۱۷/۸	۱۶/۹	زمستان					
۴۳/۹	۳۲/۸	۳۳/۷	۳۷/۹	۳۲/۳	۴۱/۸	تابستان					
۱۲/۷	۱۱/۳	۱۱/۵	۹/۲	۸/۵	۱۴/۲	زمستان	همکف		۶ (سانتی‌متر)		
۵۸/۶	۶۶/۱	۶۹/۷	۶۹/۵	۶۹/۶	۷۸/۳	تابستان					
۱۸/۴	۲۱/۶	۲۲/۵	۲۲/۲	۲۲/۶	۲۲/۸	زمستان					
۲۸/۷	۰/۰	۲۲/۱	۵۸/۸	۳۳/۲	۶۶/۸	تابستان					
۱۲/۶	۰/۰	۲۲/۹	۱۱/۴	۱۲/۹	۱۶/۹	زمستان	هشتم		۶ (سانتی‌متر)		
۳۸/۸	۲۹/۶	۲۷/۹	۳۰/۲	۳۱/۸	۴۱/۸	تابستان					
۱۲/۲	۹/۵	۹/۴	۹/۶	۸۴	۱۴/۲	زمستان					
۱۰۰۵۶/۸	۱۱۳۷۳/۶	۱۱۷۸۰/۷	۱۲۰۰۳/۶	۲۰۱۳۷/۴	۲۱۵۱۲/۸	تابستان		همکف		۴ (سانتی‌متر)	مصرف انرژی (kwh)
۶۱۴۰/۶	۷۸۷۸/۲	۸۱۶۲/۷	۸۸۷۸/۲	۹۴۸۱/۳	۱۲۱۴۰/۸	زمستان					
۱۰۵۱۲/۸	۱۱۰۵۶/۸	۱۳۰۰۳/۷	۱۶۰۵۶/۸	۲۰۰۰۳/۷	۲۱۱۳۷/۵	تابستان					
۳۳۹۴/۸	۵۱۴۰/۶	۵۱۶۲/۷	۶۱۴۰/۶	۸۱۶۲/۷	۹۴۸۱/۳	زمستان					
۱۰۰۵۶/۸	۱۰۵۱۲/۸	۱۱۱۳۷/۵	۱۱۳۷۳/۶	۱۶۰۵۶/۸	۱۹۵۱۲/۸	تابستان	هشتم	۶ (سانتی‌متر)	مصرف انرژی (kwh)		
۳۱۴۰/۶	۴۱۴۰/۶	۵۰۸۱/۳	۵۸۷۸/۲	۸۱۴۰/۶	۸۳۹۴/۸	زمستان					
۸۵۱۰/۸	۹۲۱۲/۸	۱۰۰۰۰/۶	۱۱۵۱۲/۸	۱۸۰۰۳/۷	۲۱۵۱۲/۸	تابستان					
۵۱۰۲/۵	۵۳۹۴/۸	۶۲۱۵/۲	۷۳۹۴/۸	۸۰۳۱/۷	۱۲۱۴۰/۸	زمستان					
۹۸۲۱/۸	۷۳۳۲/۶	۵۵۸۹/۷	۱۴۰۰۳/۸	۱۷۷۵۸/۷	۲۱۱۳۷/۵	تابستان	چهارم	۶ (سانتی‌متر)		مصرف انرژی (kwh)	
۲۵۳۰/۹	۲۰۳۲/۰	۱۸۹۲/۳	۶۰۰۰/۳	۸۰۲۴/۴	۹۴۸۱/۳	زمستان					
۸۸۳۲/۲	۹۵۲۳/۲	۱۰۰۰۱/۷	۱۰۳۲۸/۳	۱۳۰۲۱/۴	۱۹۵۱۲/۸	تابستان					
۲۳۰۱/۵	۳۱۰۳/۳	۴۰۱۱/۴	۶۵۰۱/۳	۷۰۰۲/۳	۸۳۹۴/۸	زمستان					

45. CFD EXPERTS Simulate the Future. *Ansys Fluent Workbench Tutorial Guide* (Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2021).

46. B.E. Launder and D.B. Spalding, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2) (1974): 269; S.A. Orszag and I. Staroselsky, "Introduction To Renormalization Group Modeling Of Turbulence", *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*, T.B. Gatski, M.Y. Hussaini and J.L. Lumley (eds.) (Oxford University Press, 1996).

47. Chen, "Comparison of Different k-ε Models for Indoor Air Flow Computations", 365.

جدول ۶ تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوها در نرم‌افزار فلوئنت و دی‌زاین‌بیلدر، تدوین: نگارندگان.

نامنظم به ۱۵٪ کاهش می‌یابد. حرارت که از محفظه به پوسته داخلی نما منتقل می‌شود، با افزایش ارتفاع، روندی کاهشی دارد. این روند به‌صورت منظم در طبقات همکف تا هشتم تا ۱۴۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین مصرف انرژی با افزایش ارتفاع این نوع نما در تابستان نسب به زمستان شرایط مطلوب‌تری دارد. در تابستان مصرف انرژی با افزایش ارتفاع به‌صورت منظم تا ۱۹۰ و در زمستان تا ۱۵۷٪ کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده آن است که هرچه این نوع نما در ارتفاع بالاتری (در این مطالعه تا طبقه هشتم) قرار گیرد، عملکرد مطلوب‌تری دارد (جدول ۷).

درصد نمای تهویه‌شده: با ثابت ماندن سایر متغیرهای مستقل مؤثر و افزایش سطح این نوع نما از صفر تا ۱۰۰٪ با گام‌های ۲۰ تا ۱۰۰٪، سرعت جریان هوای محفظه افزایش می‌یابد. این میزان نسبت به افزایش سطح دارای سیر صعودی منظم تا ۶۳٪ است. دمای پوسته داخلی نما نیز با افزایش سطح، روندی نزولی تا ۷۳٪ دارد. انتقال حرارت با افزایش سطح این نوع نما تا ۵۶/۵٪ به‌صورت منظم کاهش می‌یابد. مصرف انرژی با افزایش سطح این نما، نیز روندی نزولی دارد. این میزان در تابستان تا ۸۰ و در زمستان تا ۵۹٪ کاهش می‌یابد. افزایش سطح نمای تهویه‌شده باعث می‌شود این نوع نما از نظر تهویه طبیعی و مصرف انرژی، عملکرد مطلوبی را داشته باشد (جدول ۷).

مستقل مؤثر و با افزایش ضخامت لایه هوا به ۸، ۱۰، و ۱۲ سانتی‌متر، سرعت جریان هوای ناشی از تهویه طبیعی در محفظه تا ۵۳٪ کاهش می‌یابد. در این حالت انتقال حرارت از نما به داخل، سیر منظم صعودی تا ۳۲/۸٪ دارد و تغییرات دمای پوسته داخلی نما نیز به‌صورت منظم و صعودی تا ۴۷/۳٪ افزایش می‌یابد. بار حرارتی در تابستان و زمستان به‌ترتیب با افزایش ۵۲ و ۳۸/۸٪ روبه‌روست. این مسئله نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه هوا در محفظه باعث عملکرد نامطلوب نما می‌شود و با کاهش سرعت جریان هوا در محفظه میانی، انتقال حرارت و مصرف انرژی روند صعودی خواهند داشت (جدول ۷).

ارتفاع قرارگیری نمای تهویه‌شده: با ثابت ماندن سایر متغیرهای مستقل مؤثر و با تغییر محل قرارگیری نمای تهویه‌شده در ارتفاعات متفاوت از همکف تا هشتم، عملکرد نما نیز بازخوردهای متفاوتی داشت. سرعت جریان هوا با تغییر ارتفاع از طبقه همکف به طبقه دوم و سوم به‌ترتیب ۱۲ و ۲۳/۵٪ افزایش می‌یابد. این افزایش در طبقه چهارم، با میزان ۵۳٪، به اوج خود می‌رسد و مجدداً در طبقه پنجم و ششم با کاهش سرعت جریان هوا به ۲۲ و ۱۷٪ و نیز طبقات هفتم و هشتم به ۱۲ و ۱۰٪ کاهش می‌یابد. دمای پوسته داخلی نما نیز متناظر با افزایش سرعت جریان هوا، تا طبقه چهارم روند کاهشی تا ۴۸/۷٪ دارد و سپس در طبقات پنجم تا هشتم با گام‌های

جدول ۷. درصد تغییرات بار حرارتی وابسته با توجه به تغییرات متغیرهای مستقل، تدوین: نگارندگان.

متغیر وابسته متغیر مستقل	درصد تغییرات سرعت جریان هوا در محفظه میانی	درصد تغییرات دما در سطح پوسته داخلی	درصد تغییرات شارحرارتی عبوری از محفظه به پوسته داخلی	
			تابستان	زمستان
تغییر ضخامت لایه هوا	کاهش تا ۵۳٪	افزایش تا ۴۷/۳٪	افزایش تا ۳۲/۸٪	افزایش تا ۳۸/۸٪
تغییر ارتفاع قرارگیری نمای تهویه‌شده	افزایش تا ۵۳٪ و سپس کاهش تا ۱۰٪	کاهش تا ۴۸/۷٪ و سپس روند کاهشی نامنظم تا ۱۵٪	کاهش تا ۱۴۳٪	کاهش تا ۱۵۷٪
تغییر درصد پوشاندگی نمای تهویه‌شده	افزایش تا ۶۳٪	کاهش تا ۷۳٪	کاهش تا ۵۶/۵٪	کاهش تا ۸۰٪

۶. تحلیل کلی

در این پژوهش بر چگونگی رفتار حرارتی و جریان هوا در بناهایی با عملکرد اداری در شهر اصفهان با نمای تهویه‌شده دوپوسته غیرشفاف و بدون مجاورت و همسایگی تمرکز شده است، همچنین دستیابی به سطح بهینه، ارتفاع، و ضخامت محفظه هوای بهینه در این نوع نما برای دستیابی به انتقال حرارت و مصرف انرژی بهینه در زمستان و تابستان از اهداف دیگر در این مقاله است. کاهش بار حرارتی و صرفه اقتصادی با بررسی عوامل مختلف نیز در اکثر تحقیقات پیشینه^{۵۵} بررسی و تأیید شده است. لویز و همکاران^{۵۶} به این نتیجه رسیدند که عملکرد نمای تهویه‌شده با درز باز در حالت بهینه در تابستان بهتر از زمستان است، که این نتیجه در این پژوهش نیز به دلیل مؤثرتر بودن تابش خورشید بر بدنه جنوبی اثبات شد. در نتیجه‌گیری پژوهشی در جبهه جنوب اسپانیا^{۵۷} نیز به افزایش نرخ جریان هوا در محفظه با افزایش تشعشعات خورشید اشاره شده، که نتایج این مقاله نیز آن را تأیید می‌کند. در پژوهش دیگری^{۵۸} که نمای شرقی، غربی، و جنوبی نیز آزمون شدند، دو نمای شرقی و غربی به دمای بالاتری نسبت به دمای جنوبی رسیدند و عملکرد نامطلوب‌تری داشتند. همچنین تحقیقی^{۵۹} در نمای شمالی نشان داد که درجه حرارت داخل ساختمان نزدیک به دمای خارج است و در نتیجه انتقال حرارتی صورت نگرفته است، که این نشان می‌دهد عملکرد این نوع نما در جبهه جنوبی مطلوب‌تر است. نمای تهویه‌شده در جبهه جنوبی مقاله یادشده موجب صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۷۰ و ۱۰۰٪ در حالت بهینه در زمستان و تابستان خواهد بود؛ یعنی درحالتی که اسلب خارجی به ترتیب ۶۰ و ۸۰٪ و با ضخامت محفظه هوای ۶ سانتی‌متر باشد. صرفه‌جویی در مصرف انرژی در شرایط این مقاله در تابستان درحالتی که سطح نما کاملاً تهویه شده است نسبت به نمای ساده، برابر با ۴۶٪ است. این میزان در مقاله

48. J. Xamán, et al., "Numerical Study of Heat Transfer by Laminar and Turbulent Natural Convection in Tall Cavities of Façade Elements", *Energy and Buildings*, 37 (2005): 787; Fuliotto, et al., "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Façade", 23; A. Gagliano, et al., "Thermodynamic Analysis of Ventilated Façades under Different Wind Conditions in Summer Period". *Energy and Buildings*, 122 (2016): 131; M. Coussirat, et al., "Performance and Influence of Numerical Sub-models on the CFD Simulation of Free and Forced Convection in Double-glazed Ventilated Façades", 1781-1789; Sanjuan, et al., "Development and Experimental Validation of a Simulation Model for Open Joint Ventilated Façades", *Energy and Buildings*, 43(12) (2011): 3446; Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", 1851; Sánchez, et al., "Experimental Validation of a Numerical Model of a Ventilated Façade with Horizontal and Vertical Open Joints". *Energies*, 13(1) (2020): 146.

پاتانیا^{۶۰} در تابستان و در جبهه جنوبی برابر ۴۰٪ برآورد شده است. همچنین در پژوهشی^{۶۱} صرفه انرژی در این نوع نما برابر ۴۰٪ نسبت به نمای تهویه‌شده با درز بسته است؛ در آن مقاله صرفه‌جویی در مصرف انرژی در زمستان برای نمای تهویه‌شده نسبت به نمای ساده ۵۰٪ است که در پژوهش بالوکو^{۶۲} در زمستان و در جبهه جنوبی ۳۶٪ است. در پژوهش گالگلیانو^{۶۳} در تابستان و در همه جهات این میزان ۴۰٪ در مقایسه با نمای بدون منفذ است.

همچنین در تحقیق پیش رو با افزایش ارتفاع ساختمان مخصوصاً در فصل تابستان سرعت و میزان جابه‌جایی جریان هوا در محفظه و در نتیجه پتانسیل صرفه‌جویی افزایش می‌یابد، با توجه به آنکه پژوهشگران تحقیق پیش رو اندکی روی این مقوله کار کرده‌اند، ولی نتایج با مطالعات پیشینه^{۶۴} منطبق است. مانند نتایج مقاله حاضر، در پژوهش چامپی^{۶۵} نیز در همه حالت‌ها با افزایش ارتفاع محفظه، صرفه‌جویی در مصرف انرژی افزایش می‌یابد. همچنین مطابق نتایج مقاله سان‌جوآن^{۶۶}، با افزایش ارتفاع محفظه در نمای تهویه‌شده با درز باز، انتقال گرما افزایش می‌یابد و نیز ارتفاع کمتر نما در سرمایش کمتر مؤثر است^{۶۷}، که این نتایج در این پژوهش نیز تأیید شد. با افزایش دما در تابستان، جریان هوا در مدل‌های این پژوهش نیز صعودی و غیرمستقر است و بیشترین سرعت جریان هوا در میانه ارتفاع طبقات اتفاق می‌افتد و به همین دلیل هرچه ارتفاع بیشتر باشد، افزایش سرعت هوا در ارتفاع بالاتری اتفاق می‌افتد و برای ساختمان‌های مرتفع کارآمدتر است.^{۶۸} محفظه باریک‌تر کاهش فشار را بیشتر می‌کند که باعث عملکرد بهتری در اثر سرمایش در محفظه می‌شود.^{۶۹} در پژوهش بالوکو^{۷۰} در تابستان اثرات سرمایشی با عرض محفظه‌ای بیشتر از ۷ سانتی‌متر و برای سرمایش بیشتر، عرض محفظه بین ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر مورد تأکید است.

49. Ibid.
 50. Fluent
 51. Velocity
 52. Temperature
 53. ASHRAE, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 10
 54. Ibid, 145.
 55. C. Suárez, et al., "Heat Transfer and Mass Flow Correlations for Ventilated Facades", *Energy and Buildings*, 43(12) (2011): 3696; A. Gagliano, et al., Gagliano, A. and S. Aneli. "Analysis of the Energy Performance of an Opaque Ventilated Façade under Winter and Summer Weather Conditions", *Solar Energy*, 205 (2020): 531; K. Schabowicz and Ł. Zawislak, "Numerical Comparison of Thermal Behaviour Between Ventilated Facades", *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(4) (2020): 297-305; S. Fantucci, et al., "An Experimental Sensitivity Analysis on the Summer Thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade", *Energy and Buildings*, 225 (2020): 110354.
 56. F. Peci-López, et al., "Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain", 524.

بیشتر است. سرعت جریان هوا با افزایش سطح نمای تهویه شده افزایش می‌یابد، این میزان در حالتی که ضخامت لایه هوا ۴ سانتی‌متر است و کل نما دوپوسته است، به‌طور متوسط ۸۰٪ نسبت به نمای معمولی است. این میزان با ضخامت لایه هوای ۶ سانتی‌متر، ۷۰٪ است. همچنین سرعت جریان هوا با افزایش طبقات روند صعودی دارد، این روند در طبقه میانی بیشتر از طبقه آخر است. سرعت جریان هوا به‌طور متوسط در طبقه چهارم نسبت به هشتم ۸۲٪ و در طبقه چهارم نسبت به همکف در حالت ضخامت لایه هوای ۴ و ۶ سانتی‌متر به‌ترتیب ۸۵ و ۶۵٪ است. دمای درون محفظه در حالتی که کل سطح از نمای تهویه شده تشکیل شده باشد، به‌طور متوسط ۳۸ °C است، که این میزان با سطح ۲۰٪ نمای تهویه شده، برابر ۴۰ °C است. انتقال حرارت و میزان مصرف انرژی نیز با افزایش سطح و افزایش ارتفاع طبقات، نتایج مطلوب‌تری و در برخی سطوح و ارتفاع و ضخامت لایه هوا، روند نزولی بیشتری دارد. طبق بررسی نتایج، در صورتی که ۶۰٪ سطح نما در طبقه چهارم با این نوع نما پوشش داده شود و فاصله مابین دو لایه ۶ سانتی‌متر هوا باشد، عملکرد حرارتی مطلوب‌ترین خواهد بود و بعد از این حالت، پوشش ۸۰٪ نما با سایر شرایط یکسان با حالت قبلی، شرایط مطلوب‌تری را نسبت به سایر حالت‌ها دارد. همچنین با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، موقعیت قرارگیری نما (ارتفاع نما)، سطح نما، و ضخامت لایه هوا به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر میزان انتقال حرارت از بیرون به فضای مابین دو پوسته، میزان مصرف انرژی، و دمای پوسته داخلی نما داشتند و سطح نما، موقعیت قرارگیری، و ضخامت لایه هوا به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر سرعت جریان هوا در محفظه می‌گذارند. از آنجاکه در این مقاله مدل پایه برای شبیه‌سازی، بلوکی با کاربری اداری و با نمای دوپوسته و غیرشفاف و بدون مجاورت است، نتایج این مقاله تنها برای این شرایط معتبر است.

مطابق با پژوهش‌های گذشته^{۷۱}، هرچه درصد سطح درزهای باز بیشتر باشد، سرعت هوا درون محفظه بیشتر است، ولی مطابق با نتایج این مقاله، با وجود درصد ثابت درزهای باز، به‌خاطر افزایش سطوح پشتیبان این درزها، نماهای تهویه شده عملکرد بهتری دارند. در مورد مصالح نما چامپی در مقاله‌اش^{۷۲} در پوسته بیرونی از سرامیک (مشابه این مقاله) با ضخامت لایه هوای ۹ سانتی‌متر استفاده کرده است و بنابراین صرفه‌جویی در مصرف انرژی ۶۳٪ شده است. او ذکر می‌کند که با افزایش مقاومت حرارتی پوسته خارجی نما، صرفه‌جویی در انرژی بیشتر است. رنگ‌های تیره نیز می‌توانند با ضریب جذب حرارتی بالا درجه حرارت پوسته بیرونی را افزایش دهند، که باعث افزایش نرخ جریان هوا و همچنین افزایش انتقال تشعشعی گرما در میان لایه‌های هوا در محفظه می‌شوند. به‌طور کلی مصالح با ضریب جذب حرارتی کمتر، بهتر عمل می‌کنند.^{۷۳} در پژوهش پاتانیا^{۷۴} استفاده از مصالحی با ضریب انتقال حرارتی کمتر، چگالی بیشتر، و ظرفیت گرمایی ویژه بالاتر توصیه می‌شود. پوسته خارجی فلزی نیز باعث بالا رفتن دما بیش از حد آسایش در ساعت‌های میانی روز می‌شود و همچنین اثرات سرمایش شبانه را افزایش می‌دهد.^{۷۵}

نتیجه‌گیری

نتایج این مقاله با مقایسه داده‌های کمی (دینامیک سیالات) دما و سرعت جریان هوا و همچنین بررسی انتقال حرارتی و میزان مصرف انرژی و مشاهده رفتار حرارتی سیال در محفظه میانی بین دو پوسته در نمای تهویه شده با درز باز به‌دست آمد. افزایش سرعت سیال و کاهش دمای آن در محفظه نما بر بهبود عملکرد این نوع نما مؤثر است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که هرچه نسبت سطح این نوع نما به نمای معمولی و هرچه ارتفاع ساختمان بیشتر شود، سرعت جابه‌جایی هوا و کاهش دما

پیشنهادهای کاربردی یافته‌ها

- عملکرد حرارتی نما با تغییر در هندسه نما، شامل تغییر عرض فاصله هوایی، تغییر اندازه درز بین پانل‌ها، تغییر شکل درزا (درز صاف یا پله‌ای).
- این نوع نما در سایر جبهه‌های ساختمان.
- تأثیر ارتفاع فاصله هوایی بر عملکرد حرارتی نما (اینکه ارتفاع لایه هوا به اندازه یک، دو، یا سه طبقه باشد، چه تأثیری بر عملکرد حرارتی دارد).
- عملکرد این نوع نما با سطوح متفاوت شیشه بر روی نما و با شرایط متفاوت هم‌جواری.

- از آنجاکه این پژوهش هم مانند سایر پژوهش‌ها خالی از کم‌وکاست نیست و پژوهشگران از جنبه‌هایی نتوانسته‌اند حول موضوع بررسی کاملی انجام دهند، موارد زیر برای تحقیقات آتی قابل بررسی هستند:
- تأثیر جریان‌های ایجادشده بر نما، در حالت وزش باد و وجود رطوبت.
- عملکرد نما در طول شبانه‌روز و در هر چهار فصل سال و یا در اقلیم‌های مختلف.

57. E. Giancola, et al., "Experimental Assessment and Modelling of the Performance of an Open Joint Ventilated Façade During Actual Operating Conditions in Mediterranean Climate", *Energy and Buildings*, 54 (2012): 363-375.
58. F. Stazi, et al., "Experimental Evaluation of Ventilated Walls with an External Clay Cladding", *Renewable Energy*, 36(12) (2011): 3373-3385.
59. C. Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", 1851-1863.
60. F. Patania, et al., "Thermofluid-dynamic Analysis of ventilated facades", *Energy and Buildings*, 42(7) (2010): 1148-1155.
61. M. Ciampi, et al., "Ventilated Facades Energy Performance in Summer Cooling of Buildings", *Solar Energy*, 75(6) (2003): 491-502.
62. C. Balocco, "A Simple Model to Study Ventilated Facades Energy Performance", *Energy and Buildings*, 34(5) (2002): 469-475.

References

- Alonso, C., et al. "Energy Consumption to Cool and Heat Experimental Modules for the Energy Refurbishment of Façades. Three Case Studies in Madrid". *Energy and Buildings*, 126 (2016): 252-262.
- ASHRAE. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. 2017.
- Bagheri, F., et al. "Developing Energy Performance Label for Office Buildings in Iran". *Energy and Buildings*, 61(2013): 116-124.
- Baldinelli, G. "Double Skin Façades for Warm Climate Regions: Analysis of a Solution with an Integrated Movable Shading System". *Building and Environment*, 44(6) (2009): 1107-1118.
- Balocco, C. "A Simple Model to Study Ventilated Facades Energy Performance". *Energy and Buildings*, 34(5) (2002): 469-475.
- Balter, J., et al. "Air Cavity Performance in Opaque Ventilated Façades in Accordance with the Spanish Technical Building Code". *ACE: Architecture, City and Environment*, 13 (2019): 211-232.
- Chehrizi, G., et al. "Determining Open Space Thermal Comfort Range for Isfahan's Elementary Schools for Girls." *Soffeh*, 31(3) (2021): 43-58. (In Persian)
- Chen, Q. "Comparison of Different k-ε Models for Indoor Air Flow Computations". *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28(3) (1995): 353-369.
- Ciampi, M., et al. "Ventilated Facades Energy Performance in Summer Cooling of Buildings". *Solar Energy*, 75(6) (2003): 491-502.
- Coussirat, M., et al. "Performance and Influence of Numerical Sub-models on the CFD Simulation of Free and Forced Convection in Double-glazed Ventilated Façades". *Energy and Buildings*, 40(10) (2008): 1781-1789.
- Falk, J. and K. Sandin. "Ventilated Rainscreen Cladding: A Study of the Ventilation Drying Process". *Building and Environment*, 60 (2013): 173-184.
- Fantucci, S., et al. "Thermal Performance Assessment of an Opaque Ventilated Façade in the Summer Period: Calibration of a Simulation Model through in-field Measurements". *Energy Procedia*, 111 (2017): 619-628.
- Fantucci, S., et al. "An Experimental Sensitivity Analysis on the Summer Thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade". *Energy and Buildings*, 225 (2020): 110354.
- CFD EXPERTS Simulate the Future. *Ansys Fluent Workbench Tutorial Guide*. Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2021.
- Fuliotto, R., et al. "Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Façade". *Energy and Buildings*, 42(1) (2010): 23-28.
- Gagliano, A. and S. Aneli. "Analysis of the Energy Performance of an Opaque Ventilated Façade under Winter and Summer Weather Conditions". *Solar Energy*, 205 (2020): 531-544.
- Gagliano, A., et al. "Computational Fluid Dynamic Simulations of Natural Convection in Ventilated Facades". In A. Amimul (Ed.), *Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, IntechOpen, 2011, Ch. 17.
- Gagliano, A., et al. "Thermodynamic Analysis of Ventilated Façades under Different Wind Conditions in Summer Period". *Energy and Buildings*, 122 (2016): 131-139.
- García, B.Z., et al. "Comparison of Theoretical Heat Transfer



63. Gagliano, A., et al., "Computational Fluid Dynamic Simulations of Natural Convection in Ventilated Facades". In A. Amimul (Ed.), *Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, IntechOpen, 2011, Ch. 17.
64. S. Fantucci, et al., "An Experimental Sensitivity Analysis on the Summer Thermal Performance of an Opaque Ventilated Façade", 110354; Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", 1851-1863; Stazi, et al., "Experimental Evaluation of Ventilated Walls with an External Clay Cladding", 3373-3385.
65. Ciampi, et al., "Ventilated Facades Energy Performance in Summer Cooling of Buildings", 491-502.
66. Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", 1851-1863.
67. Stazi, et al., "Experimental Assessment of a Zinc-titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate", 525-534.
- Model with Results from Experimental Monitoring Installed in a Refurbishment with Ventilated Façade". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 410(1) (2020): 012104.
- Giancola, E., et al. "Experimental Assessment and Modelling of the Performance of an Open Joint Ventilated Façade During Actual Operating Conditions in Mediterranean Climate". *Energy and Buildings*, 54 (2012): 363-375.
- Goulart, M.F. and L.C. Labaki. "Thermal Performance of Opaque Ventilated Facades: A Systematic Review". *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 13(00) (2022): e022026.
- Gregório-Atem, C., et al. "Opaque Ventilated Façade (OVF) Thermal Performance Simulation for Office Buildings in Brazil". *Sustainability*, 12(18) (2020): 7635.
- Griffith, B. "Model for Naturally Ventilated Cavities on the Exteriors of Opaque Building Thermal Envelopes". SimBuild 2006 Conferenc, United States, Cambridge- Massachusetts, 2006.
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). *Non-residential Buildings – Determination of Energy Consumption Criteria and Energy Labeling Guidelines (Iran National Standard No. 14254)*. Tehran: ISIRI, 2012. (In Persian)
- Iribar-Solaberrieta, E., et al. "Energy Performance of the Opaque Ventilated Façade". *Energy Procedia*, 78 (2015): 55-60.
- Jaber, S. and S. Ajib. "Optimum Design of Trombe Wall System in Mediterranean Region". *Solar Energy*, 85(9) (2011): 1891-1898.
- Launder, B.E. and D.B. Spalding. "The Numerical Computation of Turbulent Flows". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2) (1974): 269-289.
- Maciel, A.C.F. and M.T. Carvalho. "Operational Energy of Opaque Ventilated Façades in Brazil". *Journal of Building Engineering*, 25 (2019): 100775.
- Majidi, F.A., et al. "Seasonal Difference of Thermal Comfort in New and Old Neighborhoods (Case Study: Jolfa and Mardavij Districts of Isfahan)". *Honar-Ha-Ye-Ziba: Memaary Va Shahrsazi*, 23(2) (2018): 31-42. (In Persian)
- Marinosci, C., et al. "Experimental Analysis of the Summer Thermal Performances of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building". *Energy and Buildings*, 72 (2014): 280-287.
- Naylor, D. and J.D. Tarasuk. "Natural Convective Heat Transfer in a Divided Vertical Channel: Part II—Experimental Study". *Journal of Heat Transfer*, 115(2) (1993): 388-394.
- Orszag, S.A. and I. Staroselsky. "Introduction To Renormalization Group Modeling Of Turbulence". *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*. T.B. Gatski, M.Y. Hussaini and J.L. Lumley (eds.). Oxford University Press, 1996.
- Pastori, S., et al. "Energy Performance Evaluation of a Ventilated Façade System through CFD Modeling and Comparison with International Standards". *Energies*, 14(1) (2021): 193.
- Patania, F., et al. "Thermofluid-dynamic Analysis of ventilated facades". *Energy and Buildings*, 42(7) (2010): 1148-1155.
- Peci-López, F. and M. Ruiz de Adana. "Sensitivity Study of an Opaque Ventilated Façade in the Winter Season in Different Climate Zones in Spain". *The Open Renewable Energy Journal*, 75 (2015): 524-533.
- Peci-López, F., et al. "Experimental Analysis and Model Validation of an Opaque Ventilated Façade". *Building and Environment*, 56 (2012): 265-275.
- Pergolini, M., et al. "Controlled Inlet Airflow in Ventilated Facades: A Numerical Analysis". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(3) (2019): 032009.
- Pica, A.L., et al. "An Experimental Investigation on Natural Convection of Air in a Vertical Channel". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36 (1993): 611-616.
- Pirkandi, J. and M. Hashemabadi. "Design and Numerical Investigation of a Small Scale Solar Chimney Using Computational Fluid Dynamics". *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 6(3) (2016): 271-280.
- Plan and Budget Organization of Iran – Technical Affairs Office. *Design Regulations for Office Buildings (Publication No. 178)*. Tehran: Plan and Budget Organization, 1998. (In Persian)
- Poirazis, H. "Double Skin Facades for Office Buildings". *Division of Energy and Building Design*. Lund: Lund Institute of Technology, 2004.
- Rabani, M., et al. "Heat Transfer Analysis of a Trombe Wall with a Projecting Channel Design". *Energy*, 134 (2017): 943-950.
- Safer, N., et al. "Three-dimensional Simulation with a CFD Tool of the Airflow Phenomena in Single Floor Double-skin Façade Equipped with a Venetian Blind". *Solar Energy*, 79(2) (2005): 193-203.
- Saghafi, M. and N. Tavassoli. "The Effect of the Ventilated Air Layer in the New Open Joint Façade on Energy Performance of the Building". *Naqshejahan*, 6(3) (2016): 5-14. (In Persian)
- Sánchez, M.N., et al. "Experimental Assessment of the Performance of Open Joint Ventilated Façades with Buoyancy-driven Airflow". *Solar Energy*, 91 (2013): 131-144.
- Sánchez, M.N., et al. "Experimental Evaluation of the Airflow Behaviour in Horizontal and Vertical Open Joint Ventilated Facades Using Stereo-PIV". *Renewable Energy*, 109 (2017): 613-623.
- Sánchez, M.N., et al. "Experimental Validation of a Numerical Model of a Ventilated Façade with Horizontal and Vertical Open Joints". *Energies*, 13(1) (2020): 146.
- Sanjuan, C., et al. "Development and Experimental Validation of a Simulation Model for Open Joint Ventilated Façades". *Energy and Buildings*, 43(12) (2011): 3456-3466.
- Sanjuan, C., et al. "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade". *Solar Energy*, 85(9) (2011): 1851-1863.

- Schabowicz, K. and Ł. Zawislak. "Numerical Comparison of Thermal Behaviour Between Ventilated Facades". *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(4) (2020): 297-305.
- Sefcik, D.M., et al. "Natural Convection in Vertically Vented Enclosures". *Journal of Heat Transfer*, 113(4) (1991): 912-918.
- Seferis, P., et al. "Investigation of the Performance of a Ventilated Wall". *Energy and Buildings*, 43(9) (2011): 2167-2178.
- Serra, V., et al. "Experimental Evaluation of a Climate Façade: Energy Efficiency and Thermal Comfort Performance". *Energy and Buildings*, 42(1) (2010): 50-62.
- Sharma, A., et al. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2) (2009): 318-345.
- Soto Francés, V.M., et al. "Modeling of Ventilated Façades for Energy Building Simulation Software". *Energy and Buildings*, 65 (2013): 419-428.
- Soudian, S. and U. Berardi. "Parametric Optimization of Multifunctional Integrated Climate-Responsive Opaque and Ventilated Façades Using CFD Simulations". *Applied Thermal Engineering*, 204 (2022): 117923.
- Stazi, F., et al. "Experimental Assessment of a Zinc-titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate". *Energy and Buildings*, 69 (2014): 525-534.
- Stazi, F., et al. "Experimental Comparison between Three Types of Opaque Ventilated Facades". *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12 (2018): 296- 308.
- Stazi, F., et al. "Experimental Evaluation of Ventilated Walls with an External Clay Cladding". *Renewable Energy*, 36(12) (2011): 3373-3385.
- Stazi, F., et al. "The Role of Wall Layers Properties on the Thermal Performance of Ventilated Facades: Experimental Investigation on Narrow-cavity Design". *Energy and Buildings*, 209 (2020): 109622.
- Straatman, A.G., et al. "A Study of Natural Convection Between Inclined Isothermal Plates". *Journal of Heat Transfer*, 116(1) (1994): 243-245.
- Suárez, C., et al. "Heat Transfer and Mass Flow Correlations for Ventilated Facades". *Energy and Buildings*, 43(12) (2011): 3696-3703.
- Suárez, M.J., et al. "Energy Evaluation of an Horizontal Open Joint Ventilated Façade". In *Applied Thermal Engineering*, 2012, 302-313.
- Tanda, G. "Natural Convection Heat Transfer in Vertical Channels with and without Transverse Square Ribs". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(9) (1997): 2173-2185.
- Xamán, J., et al. "Numerical Study of Heat Transfer by Laminar and Turbulent Natural Convection in Tall Cavities of Façade Elements". *Energy and Buildings*, 37 (2005): 787-794.

68. Sanjuan, et al., "Energy Performance of an Open-joint Ventilated Façade Compared with a Conventional Sealed Cavity Façade", 1851-1863; Sánchez, et al., "Experimental Assessment of the Performance of Open Joint Ventilated Façades with Buoyancy-driven Airflow", *Solar Energy*, 91 (2013): 131-144; Sánchez, et al., "Experimental Evaluation of the Airflow Behaviour in Horizontal and Vertical Open Joint Ventilated Facades Using Stereo-PIV", 613.
69. C. Marinosci, et al., "Experimental Analysis of the Summer Thermal Performances of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building", *Energy and Buildings*, 72 (2014): 280-287.
70. Balocco, "A Simple Model to Study Ventilated Facades Energy Performance", 469-475.
71. J. Balter, et al., "Air Cavity Performance in Opaque Ventilated Façades in Accordance with the Spanish Technical Building Code", *ACE: Architecture, City and Environment*, 13 (2019): 211; Marinosci, et al., "Experimental Analysis of the Summer Thermal Performances of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building", *Energy and Buildings*, 72 (2014): 280.
72. Ciampi, et al., "Ventilated Facades Energy Performance in Summer Cooling of Buildings", 491-502.
73. Marinosci, et al., "Experimental Analysis of the Summer Thermal Performances of a Naturally Ventilated Rainscreen Façade Building", *Energy and Buildings*, 72 (2014): 280-287.
74. Patania, et al., "Thermofluid-dynamic Analysis of ventilated facades", 1148-1155.
75. Stazi, et al., "Experimental Assessment of a Zinc-titanium Ventilated Façade in a Mediterranean Climate", 525-534.

