

Improving Natural Ventilation in Traditional Windcatcher Houses of Yazd Through Limited Interventions in Architectural Elements Considering Wind Factors; The Case of Rasoulia House

Mandana Salehian

Master's Student in Architecture, Faculty of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaee Teacher training University, Tehran, Iran

Omid Rahaei, Ph.D.* 

Assistant Professor, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Received: September 29, 2024

Revised: January 07, 2025

Accepted: January 21, 2025

(Pages: 37–56)

Salehian, Mandana and Omid Rahaei. "Improving Natural Ventilation in Traditional Windcatcher Houses of Yazd Through Limited Interventions in Architectural Elements Considering Wind Factors; The Case of Rasoulia House". *Soffeh* 36, no. 1 (2026): 37–56.

DOI: <http://doi.org/10.48308/soffeh.2026.237047.1364>

Abstract:

Background and objectives: One of the significant innovations for utilising wind energy, windcatchers create airflow and enhance natural ventilation through air pressure differences. Many traditional houses in hot, arid areas of Iran utilise windcatchers as generators of natural ventilation. However, their often work for windcatcher chambers, with little to no impact on other spaces. The aim of this study is to examine various airflow transfer patterns in traditional windcatcher-equipped houses in Yazd, and analyse the effectiveness of each pattern in improving natural ventilation performance.

Keywords:

Wind tower, Natural ventilation, Traditional houses of Yazd, CFD.



SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 36, Issue 1, No. 112, 2026



P-ISSN: 1683-870X

*. Copyright: © 2026 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: o.rahaei@sru.ac.ir
<http://doi.org/10.48308/soffeh.2026.237047.1364>

Materials and methods: Through typological analysis, four dominant airflow transfer patterns in Yazd's traditional houses were identified, with the Rasoulia House randomly selected to model these four patterns. Limited interventions were simulated under identical conditions to evaluate their impact on the amount, velocity, and coverage of airflow. The research methodology combines library studies, CFD simulations using COMSOL Multiphysics software, experimental tests, and numerical calculations based on RANS time-averaged equations.

Results and conclusion: The simulation results revealed that the airflow transfer pattern from the windcatcher chamber to other spaces significantly influences the amount and velocity of airflow. Among the four dominant patterns, the parallel pattern achieved the highest maximum airflow velocity (19.5 m/s). However, the continuous pattern showed higher airflow velocity at the end of its path (16 m/s) and maintained a consistently higher average velocity throughout its trajectory. This indicates that the continuous pattern can enhance the natural ventilation performance of traditional windcatcher-equipped houses in hot and arid climates.

بهبود تهویه طبیعی خانه‌های سنتی بادگیردار یزد با مداخله محدود در عناصر کالبدی معماری با در نظر گرفتن باد

نمونه موردی: خانه رسولیان^۱

ماندانا صالحیان^۲

امید رهایی^۳

دریافت: ۸ مهر ۱۴۰۳

بازبینی: ۱۸ دی ۱۴۰۳

پذیرش: ۲ بهمن ۱۴۰۳

(صفحه ۳۷-۵۶)

استادیار دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

صالحیان، ماندانا و امید رهایی. «بهبود تهویه طبیعی خانه‌های سنتی بادگیردار یزد با مداخله محدود در عناصر کالبدی معماری با در نظر گرفتن باد؛ نمونه موردی: خانه رسولیان». فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صنفه، سال ۳۶، شماره ۱ (۱۴۰۵): ۳۷-۵۶.

کلیدواژگان: بادگیر، تهویه طبیعی، خانه‌های سنتی یزد، CFD.

چکیده

اهداف و پیشینه: یکی از ابداعات مهم در جهت استفاده از انرژی باد، بادگیر است که با اختلاف فشار موجب ایجاد جریان هوا و بهبود عملکرد تهویه طبیعی می‌شود. در بسیاری از خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک ایران بادگیر نقش مولد ایجاد تهویه طبیعی دارد، حال آنکه تأثیر آن اکثراً محدود به اتاقک بادگیر است و تأثیری بر دیگر فضاهای پلان ندارد. هدف در پژوهش حاضر بررسی انواع الگوهای انتقال جریان هوا در خانه‌های سنتی بادگیردار شهر یزد و تحلیل میزان اثر هریک از این الگوها در بهبود عملکرد تهویه طبیعی است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق با انجام فعالیت گونه‌شناسی در خانه‌های سنتی یزد، به ۴ گونه غالب انتقال جریان هوا دست یافتیم. در ادامه برای مدل‌سازی این ۴ الگو، از بین خانه‌های بررسی‌شده، خانه رسولیان به‌صورت تصادفی انتخاب شد تا با مداخلاتی محدود بتوان عملکرد این الگوها را در شرایط یکسان شبیه‌سازی کرد تا مشخص شود هریک چه تأثیری در مقدار، سرعت و پوشش‌دهی جریان هوا می‌گذارند. روش این پژوهش ترکیبی است از روش مطالعه کتابخانه‌ای، شبیه‌سازی به روش CFD به‌وسیله نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، آزمایشات

تجربی و محاسبات عددی با معادلات میانگین زمانی RANS.

نتایج و جمع‌بندی: در نتیجه شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که الگوی انتقال جریان هوا از اتاقک بادگیر به فضاهای دیگر پلان تأثیر بسزایی بر سرعت جریان هوا دارد. طبق نتایج عددی به‌دست‌آمده، از میان ۴ گونه غالب، باوجود اینکه از میان گونه‌ها، سرعت بیشینه جریان هوا در گونه موازی با میزان ۱۹/۵ متر بر ثانیه نسبت به باقی گونه‌ها، بالاترین بوده، اما در پایان مسیر سرعت جریان هوا در گونه پیوسته با میزان ۱۶ متر بر ثانیه از باقی گونه‌ها بیشتر بوده و همچنین در طول مسیر همواره میانگین سرعت بالاتری از دیگر گونه‌ها داشته است که می‌تواند عملکرد تهویه طبیعی را در خانه‌های سنتی بادگیردار اقلیم گرم و خشک بهبود بخشد.

مقدمه

بادگیر از شاهکارهای معماری ایران است که با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد، موجب تهویه طبیعی و بهبود کیفیت هوای فضای داخلی ساختمان می‌شود. به‌طور کلی عملکرد بادگیر در فرایند تهویه

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش معماری - معماری نگارنده اول است که با عنوان طراحی مجموعه بومگردی در یزد با رویکرد بهبود وضعیت تهویه طبیعی توسط مداخله محدود در عناصر کالبدی معماری با راهنمایی نگارنده دوم در دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در تاریخ شهریورماه سال ۱۴۰۳ دفاع شده است.

۲. کارشناس ارشد معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

mandana.sa18@gmail.com

۳. نویسنده مسئول

o.rahaei@sru.ac.ir



پرسش‌های پژوهش

۱. آیا تغییر الگوی انتقال جریان هوا در

بهبود این فرایند مؤثر است؟

۲. در ساخت خانه‌های سنتی اقلیم

گرم و خشک در ایران برای انتقال بهینه

جریان هوا از چه الگو (یا الگوهای)

پیروی می‌شود؟

4. M.N. Bahadori, et al.,
*Wind Towers: Architecture,
Climate and Sustainability*
(Switzerland, London:
Springer International
Publishing, 2014), 1-17.

۵. مهدی بهادری‌نژاد و علیرضا دهقانی،
بادگیر، شاهکار مهندسی ایرانی (تهران:
یزدا، ۱۳۹۷).

6. HVAC: Heating, Ventilation,
and Air Conditioning

7. IEQ: Indoor Environmental
Quality

8. GHG: Green House Gas

9. A. Dehghani-Sanij,
"Providing Thermal Comfort
for Buildings' Inhabitants
Through Natural Cooling and
Ventilation Systems: Wind
Towers, Achieving Building
Comfort by Natural Means",
Innovative Renewable Energy
(Cham: Springer, 2022),
391-422.

۱۰. محمد کاظمی و مجتبی اکبریان،
«مطالعه رفتار حرارتی سرداب‌های
خانه‌های سنتی یزد و ارائه پیشنهادی
برای وضعیت بهینه آن»، اولین کنفرانس
معماری و فضاهای شهری پایدار، ایران،
۱۳۹۲.

11. Computational Fluid
Dynamics

طبیعی متأثر از دو پدیده نیروی باد و استفاده از اثر دودکشی است. بادگیر می‌تواند علاوه بر تأمین باد، با خارج کردن حرارت از کالبد ساختمان، فضای داخلی را خنک کند.^۴ محققان در مباحث مربوط به گونه‌شناسی، با توجه به تنوع فراوان بادگیرها از نظر سازه‌ای، دینامیکی، و شکلی، به بررسی زمینه‌های یادشده در بادگیرها پرداخته‌اند.^۵ امروزه فراهم کردن محیطی از نظر حرارتی راحت در داخل ساختمان‌ها موضوعی بسیار مهم است؛ چراکه بسیاری از افراد بخش عمده‌ای از وقت خود را در محیط‌های داخلی سپری می‌کنند و راحتی حرارتی به‌طور مستقیم در بهره‌وری، سلامت، و رفاه آنها مؤثر است. در حال حاضر، بسیاری از سیستم‌های گرمایش، تهویه، و سرمایشی^۶ متداول، با انواع، اندازه‌ها، و ظرفیت‌های مختلف، در سطح جهانی به‌منظور برآورده کردن نیازهای حرارتی ساختمان‌ها و ایجاد کیفیت مناسب محیط داخلی^۷ برای ساکنان به کار می‌روند. این سیستم‌ها انرژی الکتریکی زیادی را در سطح جهانی مصرف می‌کنند که عمدتاً از نیروگاه‌های سوخت فسیلی تأمین می‌شود و تأثیر قابل‌توجهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای^۸ و آلودگی زیست‌محیطی دارد. در مقابل، سیستم‌های خنک‌کننده و تهویه طبیعی مانند برج‌های باد یا بادگیرها می‌توانند نه تنها در ایجاد شرایط آسایش حرارتی داخلی کمک کنند، بلکه با کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان، در کاهش چالش‌های زیست‌محیطی محلی، منطقه‌ای، و جهانی نیز مؤثر باشند.^۹ یکی از روش‌های به‌کارگیری تهویه طبیعی، در معماری سنتی شهرهایی با اقلیم گرم و خشک همچون شهر یزد دیده می‌شود. معماران سنتی شهر یزد توانسته‌اند در طول تاریخ با استفاده از بادگیر و دیگر المان‌های معماری، راهکارهای بهینه‌ای را برای استفاده از تهویه طبیعی عرضه و اجرا کنند. در خانه‌های سنتی شهر یزد، به‌منظور بهره‌وری از تهویه طبیعی، الگوهای متفاوتی از انتقال جریان هوا متداول هستند که در این مقاله با تحلیل پلان این خانه‌ها، آنها شناسایی و گونه‌شناسی شده‌اند. باوجود کارآمد بودن این الگوها، با گذشت زمان و تغییر نیازها و سبک زندگی انسان، استفاده از بادگیر به سبک سنتی نتوانسته انتظارات انسان امروز را برآورده کند تاجایی که مشاهدات نشان می‌دهد ساکنین خانه‌های سنتی اغلب دریچه هوای اتاقک بادگیر را بسته‌اند و از خنک‌کننده‌های پرمصرف استفاده می‌کنند.^{۱۰} همچنین یکی از معایب استفاده از بادگیر این است که تنها برای بخش تابستان‌نشین و یا سرداب مناسب است



12. Energy Information Administration. *U.S. Energy Data Report* (Washington, DC: U.S. Department of Energy, 1995); H. Koch-Nielsen, *Stay Cool - A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates* (New York: Routledge, 2007).

13. Building Research Energy Conservation Support Unit. *Energy Consumption Guide 19, Energy Efficiency in Offices* (London: Energy Conservation Support Unit (Gov), 1993).

14. R. Fayaz and A. Atrvash, "The Effect of Sash on Airflow in the Interior: Case Study of the Zinat al-Molk House, Shiraz", *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, vol. 6, no. 9 (2016): 19-26.

۱۵. مجید عمیدپور و همکاران، «بررسی اثرات استفاده از بخاری‌های بدون دودکش بر کیفیت هوای داخل ساختمان»، مجموعه مقالات همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت (تهران: انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸).

۱۶. نگار صادقی و همکاران، «بررسی عددی عملکرد حرارتی یک بادگیر برای تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک»، *مجله انرژی‌های تجدیدپذیر و نو*، دوره ۸، ش. ۱ (فروردین ۱۴۰۰): ۲۳-۴۰.

ضرورت دارد تا شبیه‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی اعتبار یابند.^{۱۷} مطالعه اجزای معماری داخلی در فضای تهویه مطبوع و همچنین بررسی میزان مصرف انرژی در زمان نصب یا حذف به لحاظ کیفی حایز اهمیت است.^{۱۸} منتظری و همکاران به بررسی و شبیه‌سازی CFD جریان هوا در ساختمان‌های بادگیردار پرداخته‌اند. آنها با آنالیز کارکرد بادگیرهای مورد نظر در جهت‌گیری‌های متفاوت بازشوها، جریان هوا را در هر وضعیت بررسی کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش ابعاد بازشوها در بادگیرهای یک‌طرفه (نسبت سطح داخلی به سطح خارجی بیش از ۱)، کاهش سرعت القایی جریان باد و در نتیجه آن کاهش بازده بادگیر را به همراه دارد.^{۱۹} تهویه طبیعی در بنایی با سقف استوانه‌ای بسیار حساس به زاویه باد است و همچنین سقف استوانه‌ای به اندازه بادگیر در بهبود عملکرد تهویه طبیعی مؤثر است.^{۲۰} بادگیر چهارجهته در ۶۸/۵٪ از زوایای حمله در حالت برآیند به صورت مکشی، و در بقیه زوایا با نسبت تقریباً برابر نقش تعویض‌کننده هوا را دارد.^{۲۱} کومار و همکاران با شبیه‌سازی به روش CFD مشخص کردند که با افزایش سرعت باد، کیفیت تهویه با در نظر گرفتن تأثیر شناوری، بهتر می‌شود.^{۲۲} وبهانگ و همکاران نیز اذعان داشتند که شبیه‌سازی CFD نقشی کلیدی دارد؛ چون اجازه می‌دهد طراحان تحلیل و ارزیابی دقیقی از نحوه اجرای تهویه طبیعی در ساختمان داشته باشند.^{۲۳} مرونی نیز در پژوهش خود، با مقایسه نتایج به دست آمده دریافت که روش شبیه‌سازی دینامیک سیالات CFD می‌تواند با دقتی بالا به نتایج تونل باد برسد.^{۲۴} افشین و سوهانکار نیز با بررسی تأثیر زاویه باد بر یک بادگیر دوطرفه، به طور تجربی دریافتند که زاویه باد تأثیر عمده‌ای بر عملکرد بادگیر و افزایش جریان هوای تولیدشده دارد.^{۲۵} زاک و شارما با روش CFD مشخص کردند که مقادیر فشار و جریان در مسیرهای هوای رو به باد و پشت به باد وابسته به سرعت هوا

و دیگر فضاهای خانه دچار افت جریان هوا و میزان تهویه می‌شوند. در پژوهش حاضر برای مطالعه راه‌های استفاده از تهویه طبیعی، پس از تحلیل و شناسایی الگوهای انتقال جریان هوا در خانه‌های سنتی بادگیردار یزد، ۴ گونه بهینه‌تر این الگوها را شناسایی کردیم.

در ادامه به منظور مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد هریک از این الگوها در شرایط یکسان با ارائه مداخلات اندک معماری توسط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و با استفاده از روش CFD^{۱۱}، خانه رسولیان به صورت تصادفی انتخاب شد تا پس از شبیه‌سازی هریک و مقایسه عملکردشان با یکدیگر، بهینه‌ترین این الگوها و مناسب‌ترین وضع گردش جریان هوا در پلان و در نتیجه تأثیر عملکرد تهویه طبیعی در فضای داخلی خانه‌های بادگیردار شناسایی شود.

۱. پیشینه تحقیق

با وجود آنکه امروزه سیستم‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌ها انتخاب نهایی برشمرده می‌شوند، اما بسیار گران و پرهزینه‌اند؛^{۱۲} چنان‌که هزینه انرژی یک ساختمان با تهویه طبیعی مناسب، ۴۰٪ کمتر از یک ساختمان با تهویه مطبوع است.^{۱۳} کنترل جریان هوا می‌تواند راهکاری برای نزدیک شدن به شرایط مناسب دمایی و کاهش نرخ ناراضایتی حرارتی باشد.^{۱۴} آگاهی از جریانات هوای داخلی در محیط‌های بسته به سه دلیل قابل توجه است: کنترل دما، کیفیت هوای داخل، و مصرف انرژی ساختمان.^{۱۵} در معماری مدرن علاوه بر نیازهای اولیه و در نظر گرفتن زیبایی فضا و نمای ساختمان، توجه به طرح‌هایی برای جلوگیری از اتلاف انرژی عاملی مهم و تعیین‌کننده به‌شمار می‌رود.^{۱۶}

شبیه‌سازی‌های عددی در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی بسیار ارزان‌تر و سریع‌تر هستند؛ باین‌حال

۱۷. عمیدپور و همکاران، «بررسی اثرات استفاده از بخاری‌های بدون دودکش بر کیفیت هوای داخل ساختمان».

18. P. Aryal and T. Leephakpreeda, "CFD Analysis on Thermal Comfort and Energy Consumption Effected by Partitions in Air-Conditioned Building", In *Proceedings of International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies*, (2015): 183-188.

19. H. Montazeri, F. Montazeri, "CFD Simulation of Cross Ventilation in Buildings Using Rooftop Wind-Catchers: Impact of Outlet Openings", *Renewable Energy*, 118 (2018): 502-520.

20. M. Kazemi Esfeh, et al., "Experimental and Numerical Evaluation of Wind-Driven Natural Ventilation of a Curved Roof for Various Wind Angles", *Building and Environment*, 205 (2021): 108275.

۲۱. حسین دهقانی و همکاران، «تحلیل عددی عملکرد بادگیر چهار طرفه متصل به تالار و حیاط در زوایای مختلف وزش باد»، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۶، ش. ۱۲ (اسفند ۱۳۹۵): ۱۲۵-۱۳۴.

در اقلیم خارجی است.^{۲۶} هدی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics با روش CFD مشخص کردند پخش سرعت هوا در اطراف و داخل بنا به شکل کلی ساختمان بستگی دارد.^{۲۷} لین و همکاران در پژوهشی در خصوص مقایسه تأثیر انواع تهویه در فضای داخلی مشخص کردند که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG را می‌توان برای پیش‌بینی میدان جریان تهویه لایه‌ای به کار برد.^{۲۸} محمودی و مفیدی در پژوهشی مرتبط با تحلیل خانه رسولیان، رفتار سه نمونه پلان بادگیر را بررسی کردند و نتایج آن حاکی از تفاوت نتایج دما و رطوبت در هر کدام بود.^{۲۹} صادقی و همکاران با استفاده از تحلیل عددی و حرارتی به این نتیجه رسیدند که بهره‌گیری از بادگیر می‌تواند منجر به کاهش دما تا حدود ۹ درجه سانتی‌گراد در اقلیم گرم و خشک شود.^{۳۰} کسیم و زاکی با استفاده از معادلات میانگین رینولتز و ناویر - استوکس و مدل توربولانس $k-\epsilon$ مشخص کرده‌اند که بازوهای رو به باد بادگیر جریان هوای بیشتری ایجاد می‌کنند.^{۳۱} در پژوهش هدی و همکاران با روش CFD و نرم‌افزار COMSOL مشخص شد که سرعت جریان هوا در تهویه طبیعی، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای با تغییر شکل بنا تغییر می‌کند.^{۳۲} در تحقیق شاعری و مهدوی‌نژاد نیز از روش CFD و نرم‌افزار COMSOL و تونل باد برای شبیه‌سازی طراحی دودکش خورشیدی نوین و بررسی عملکرد آن استفاده شده است.^{۳۳} آسمی و چاندرا با استفاده از بادنچ^{۳۴} و نرم‌افزار COMSOL برای شبیه‌سازی جریان هوا مشخص کردند که اختلاف اطلاعات تجربی و شبیه‌سازی شده بین ۳ تا ۱۰٪ تفاوت دارد.^{۳۵} لیو و همکاران نیز با روش CFD و نرم‌افزار COMSOL به این نتیجه دست یافتند که استفاده از فن در قسمت پایین اتاق تأثیر مناسبی در جریان هوا دارد.^{۳۶} آلواردو و همکاران به‌منظور پیش‌بینی رفتار دمایی و رطوبتی دیوار سبز، از یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار COMSOL استفاده کرده‌اند

که اطلاعات با مدل پیشنهادی محققان مقایسه شده است.^{۳۷} در پژوهش بالوکو تحلیل رفتار تهویه طبیعی قصر تاریخی پیتی در فلورانس با نرم‌افزار COMSOL بررسی شده و نتایج آن با نتایج تونل باد مطابقت داشته است که مشخص می‌کند روش CFD با رویکرد مدل‌سازی المان محدود می‌تواند دلیل پشتیبانی باشد در مسائل مربوط به تحلیل و بررسی تهویه سنتی در ساختمان‌های تاریخی،^{۳۸} همچنین او تهویه طبیعی یک ساختمان قدیمی در شهر پالرمو در ایتالیا را توسط نرم‌افزار COMSOL بررسی کرده است که اثربخشی این نوع تهویه را در گرم‌ترین روزهای تابستان نشان می‌دهد. نتایج این شبیه‌سازی نیز با مقادیر تجربی اندازه‌گیری‌شده در طول آزمایش مطابقت دارد.^{۳۹} کاستیو روشی جدید برای همسان‌سازی دمای محیط برای ساکنین عرضه کرده که نتایج آن با روش CFD و نرم‌افزار COMSOL تغییرات محیطی بررسی شده است.^{۴۰} طبق بیانیه سازمان اعتبارسنجی خدمات امریکا در مورد آزمون تجسم جریان هوا، شمع‌ها انتخابی محبوب برای تولید دود به‌صورت کنترل‌شده هستند؛ آنها از یک قتیله آهسته‌سوز تشکیل شده‌اند که منبع دود ثابتی را برای تجسم جریان هوا فراهم می‌کنند.^{۴۱} بر اساس موارد فوق، استفاده از تهویه طبیعی، که دغدغه بسیاری از پژوهشگران دهه اخیر بوده، متضمن منافع بسیاری است و موضوعی مهم و ضروری به‌شمار می‌رود. علاوه‌براین یافتن یک الگوی بهینه با تمرکز بر مسیر جریان هوای داخلی در خانه‌های سنتی و توجه به جای‌گیری فضاهای اطراف اتاقک بادگیر نکته‌ای است که قبلاً به آن پرداخته نشده است، در پژوهش حاضر به این مهم توجه شده، خصوصاً اینکه به‌طور اختصاصی در مورد الگوی جریان هوای داخلی خانه‌های سنتی شهر یزد بررسی گردیده است. بنابراین نگاه ما در این تحقیق به موضوع نوینی است و رسیدن به الگویی کارآ برای بهبود گردش هوای داخلی در خانه‌های سنتی دنبال می‌شود.



22. R. Kumar, et al., "Building Design on Wind-Driven Natural Ventilation with Different Simulation Air Models", In *Proceedings of Third International Conference on Futuristic Trends in Materials and Manufacturing*, vol. 46, no. 15, 2021, 6770-6774.

23. Weihong Guoa, et al., "Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings", 9th *International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) Joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)*, vol. 121, 2015.

24. R. Meroney, "CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation", 11th *Americas Conference on Wind Engineering*, 2009.

25. M. Afshin and A. Sohankar, "An Experimental Study on the Evaluation of Natural Ventilation Performance of a Two-Sided Wind-Catcher for Various Wind Angles", *Renewable Energy*, 85 (2015): 1068-1078.

است تا میزان جریان هوا و تحلیل رفتار تهویه طبیعی داخلی مجموعه قبل و بعد از مداخلات مقایسه شود. همچنین برای شبیه‌سازی جریان هوا از مدل آشفتگی SST $k - \epsilon$ استفاده شده است (با توجه به پیشینه تحقیق)، مدل $k - \epsilon$ یکی از مدل‌های بسیار پرکاربرد آشفتگی و محاسبات مربوطه است که باوجود سادگی باعث بالا رفتن سرعت حل محاسبات می‌شود و پتانسیل تطبیق بسیار بالایی دارد. همچنین برای مطابقت نتایج شبیه‌سازی نیز از روش تحلیل عددی بر اساس معادلات میانگین زمانی (RANS) استفاده شده که با توجه به پیشینه پژوهش، در بسیاری از تحقیقات مرتبط از موارد بالا استفاده شده است. بنابراین روش تحقیق این پژوهش ترکیبی است از شبیه‌سازی، پژوهش موردی، و محاسبات عددی. تدابیر مورد نظر برای انجام پژوهش حاضر شامل مطالعه کتابخانه‌ای، تکیه بر نتایج تحقیقات مشابه، شبیه‌سازی، و سنجش نتایج با تحلیل عددی است.

۳. گونه‌شناسی خانه‌های سنتی یزد بر اساس موقعیت بادگیر و گردش جریان هوا

همان‌گونه که در «جدول ۱» مشاهده می‌شود، ۲۱ نمونه از خانه‌های سنتی شهر یزد را نگارندگان انتخاب و بررسی کرده‌اند. جزئیات هریک شامل مساحت، تعداد طبقات، تعداد اتاق‌ها، تعداد بادگیر، اضلاع بادگیر، ارتفاع بادگیر، موقعیت بادگیر در پلان، و فرم کلی پلان در جدول یادشده ارائه شده است. در ستون پلان نمونه موردی، موقعیت قرارگیری بادگیر در هر مجموعه با رنگ قرمز مشخص شده است. در ستون دیاگرام فضایی، ابتدا محققان مسیرهای انتقال جریان هوا در هر خانه را شناسایی کرده و سپس برای ساده‌سازی انتقال اطلاعاتی همچون محل و نحوه اتصال اتاق‌ها و راهروها به یکدیگر این مسیرها را به‌صورت دیاگرام درآورده‌اند.

با توجه به پیشینه گردآوری‌شده، در اکثر پژوهش‌های مشابه از روش CFD و نرم‌افزار COMSOL Multiphysics مورد استفاده بوده و در بسیاری از آنها روش‌های تجربی و عددی توصیه شده است. همچنین در بسیاری از شرایط مشابه از مدل آشفتگی SST $k - \epsilon$ استفاده شده است.

۲. روش تحقیق

در پژوهش حاضر انواع الگوهای جریان هوا و تأثیرگذاری هرکدام در خانه‌های سنتی شهر یزد بررسی شده است. هدف برطرف کردن ناکارآمدی عملکرد بادگیر در ایجاد گردش جریان هوا و انتقال آن به‌صورت بهینه به همه پلان است. ازآنجاکه بسیاری از پژوهش‌های معماری بین‌رشته‌ای هستند، استفاده از روش‌های خاص ترکیبی را می‌طلبند.^{۴۳}

با توجه به مطالب پیش‌گفته، ۲۱ مورد از خانه‌های سنتی شهر یزد (جامعه آماری پژوهش) به‌طور تصادفی انتخاب و گونه‌شناسی شده‌اند (جدول ۱). در این پژوهش نحوه قرارگیری فضاهای داخلی خانه‌ها متغیر مستقل و الگوی جریان هوای داخلی متغیر وابسته در این مطالعه هستند. پس از رسیدن به ۴ گونه اصلی انتقال جریان هوا در خانه‌های سنتی شهر یزد در «جدول ۲»، به‌منظور شبیه‌سازی و بررسی تأثیر هریک از این گونه‌ها، خانه رسولیان با عنوان نمونه مورد تصادفی سالم انتخاب گردیده و شبیه‌سازی‌ها با روش دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است (بر اساس پیشینه پژوهش). به‌منظور اعتباربخشی اطلاعات ورودی به نرم‌افزار از نتایج به‌دست‌آمده از به‌کارگیری تونل باد و آزمایش‌های تجربی در مقاله‌ای با شرایط مشابه استفاده شده است. سرعت باد و شرایط مرزی مورد استفاده بر اساس نتایج این پژوهش است (ت ۷ و ۸). مدل‌سازی هندسی، ایجاد شبکه (مش‌بندی)، و تحلیل شبکه توسط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده

26. A. Zaki and R. N. Sharma, "A CFD Simulation Study of Natural Ventilation with a Two-Sided Wind Catcher System", In *9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, Auckland, New Zealand, 2017.

27. S. Houdaa, et al., "A CFD COMSOL Model for Simulating Complex Urban Flow", *Journal of Materials and Energy I & II*, 139 (2017): 373-378.

28. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations

29. Z. Lin, et al., "Comparison of Performances of Displacement and Mixing Ventilations, Part II: Indoor Air Quality", *International Journal of Refrigeration*, 28 (2005): 288-305.

۳۰. مهناز محمودی و سیدمجید مفیدی، «بررسی چگونگی تاثیر گذاری پلان معماری بادگیرها در کاهش دمای محیط»، نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ش. ۲ (بهار ۱۳۹۰): ۸۳-۹۱.

جدول ۱. گونه‌شناسی خانه‌های سنتی یزد، تدوین: نگارندگان، مأخذ: K. Haji-Ghasemi, *Treasury of Yazd Traditional Houses*, Shahid Beheshti University Press, First Edit, pp. 41-49, 2004. (In Persian)

در بررسی‌ها مشخص گردید که از طریق تحلیل پلان خانه‌های سنتی یزد می‌توان به شناخت عمیق‌تری از نحوه انتقال جریان هوا از اتاقک بادگیر به فضاهای دیگر پلان دست یافت. با توجه به مشاهدات مشخص شد که در شهر یزد عموم بادگیرها دارای پلان چهارضلعی با سطح مقطع مستطیل هستند که این شکل غالب بادگیرهای اکثر شهرهای اقلیم گرم و خشک نیز هست و ارتفاع این بادگیرها عموماً بین ۵ تا ۱۵ متر است. اکثر معماران شهر یزد، به‌مثابه یک اصل در ساخت و استفاده از بادگیر، آن را در بخش تابستان‌نشین پلان خانه بنا

می‌کردند تا در فصول گرم سال استفاده مفیدتری داشته باشد. همچنین اکثر خانه‌های بررسی شده دارای ۱۵۰۰-۲۰۰۰ متر مربع زیربنا، ۲ طبقه و حدود ۳۰-۴۵ اتاق هستند که با ۱ یا ۲ بادگیر پوشش داده می‌شود. علاوه بر نتایج کلی مطرح‌شده، هدف اصلی گونه‌شناسی انجام‌شده در «جدول ۱» تحلیل الگوهای انتقال جریان هوا در خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک از طریق دسته‌بندی دیاگرام‌های فضایی بوده که نتایج آن در «جدول ۲» مشخص شده است. نگارندگان الگوهای انتقال جریان هوا را، بر اساس بررسی دیاگرام‌های ساده‌سازی‌شده،

نام نمونه موردی‌ها	مساحت (m ²)	تعداد طبقات	تعداد اتاق‌ها	تعداد بادگیر	اضلاع بادگیر	ارتفاع بادگیر	بادگیر مورقین	فرم کلی پلان	دیاگرام فضایی	پلان نمونه موردی
خانه لاری‌ها	۱۷۰۰	۳	۲۲	۱	۴	۱۶	S	مربع		
خانه آقازاده	۸۲۰	۲	۱۷	۱	۴	۱۸	S	مستطیل		
خانه رسولیان	۱۵۰۰	۲	۱۰	۲	۴	۱۰ ۱۲	SW	مربع مستطیل		
خانه مرتاضیون	۱۷۰۰	۲	۲۵	۱	۴	۱۲	M	مستطیل		
خانه اخوان سیگاری	۱۴۰۰	۲	۳۰	۲	۴	۱۰	M S	مستطیل		
خانه اردکانیان	۱۵۰۰	۳	۳۰	۲	۴	۱۰	W S	مستطیل		
خانه سمسار	۱۵۰۰	۲	۲۵	۱	۴	۱۴	S	مستطیل		
خانه تهرانی‌ها	۲۰۰۰	۲	۳۰	۱	۴	۱۰	SW	مستطیل		
خانه روحانیان	۱۵۰۰	۲	۲۵	۱	۴	۱۴	S	مستطیل		
خانه ریسمانیان	۱۴۰۰	۱	۲۲	۱	۴	۷/۵	S	مستطیل		

۳۱. صادقی و همکاران، «بررسی عددی عملکرد حرارتی یک بادگیر برای تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک»، ۲۳-۴۰.

32. N. Kasim and A. Zaki, "CFD Study of Cross Ventilation Performance of Different Buildings Layouts", In *Proceedings of the 2nd Asia conference of International Building Performance Simulation Association*, Nagoya, Japan, 2014.

33. S. Houda, et al., "A CFD COMSOL Model for Simulating Complex Urban Flow", 373-378.

34. J. Shaeri, et al., "A New Design to Create Natural Ventilation in Buildings: Wind Chimney", *Journal of Building Engineering*, 59 (2022).

35. Anemometer

36. A. Asmi, et al., "Simulation of Room Airflow Using COMSOL Multiphysics Software", *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vols. 465-466, (2013): 571-577.

ادامه جدول ۱.

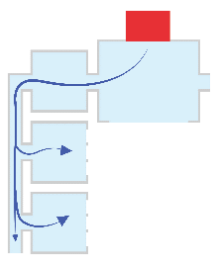
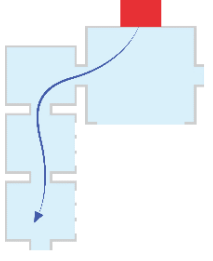
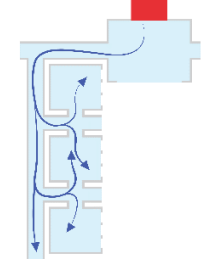
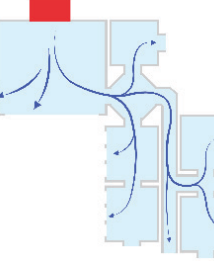
گونه‌شناسی خانه‌های سنتی یزد، تدوین: نگارندگان، مأخذ:

K. Haji-Ghasemi, *Treasury of Yazd Traditional Houses*, Shahid Beheshti University Press, First Edit, pp. 41-49, 2004. (In Persian)

انتقال جریان هوا از میان ۴ الگوی شناسایی شده است، به همین سبب برای در نظر گرفتن شرایط مرزی یکسان برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی گونه‌ها، از میان ۲۱ نمونه مطالعاتی، یک نمونه موردی به صورت تصادفی انتخاب شده که بعد از اعمال مداخلات محدود کالبدی، پلان نمونه طبق هر گونه مدل‌سازی شده است. در ادامه، به منظور بررسی عملکرد نمونه‌ها پس از شبیه‌سازی، نمودار سرعت باد و نحوه گردش جریان هوا در هریک از گونه‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

به ۴ گونه مستقیم، پیوسته، موازی، و ترکیبی نامگذاری و دسته‌بندی کرده‌اند که شرح نحوه عملکرد هر کدام و اینکه در کدام یک از نمونه‌های موردی به کار رفته‌اند مشخص شده است. در «ت ۱» نیز میزان فراوانی استفاده از هریک از این گونه‌های انتقال جریان هوا در ۲۱ نمونه بررسی شده مشخص گردیده است. نکته قابل توجه اینکه، در تعدادی از خانه‌ها چندین گونه انتقال هوا هم‌زمان استفاده شده‌اند؛ به همین خاطر، در «جدول ۲» نام این خانه‌ها در موارد متعددی مشاهده می‌شود. هدف در پژوهش حاضر مشخص کردن بهینه‌ترین الگوی

نام نمونه موردی‌ها	مساحت (m2)	تعداد طبقات	تعداد اتاق‌ها	تعداد بادگیر	اضلاع بادگیر	ارتفاع بادگیر	موقعیت بادگیر	فرم کلی پلان	دیگرام فضایی	پلان نمونه موردی
خانه شفیع پور	۱۷۰۰	۲	۳۸	۱	۴	۱۵	S	مستطیل		
خانه علیرضا عرب	۱۶۰۰	۳	۲۵	۲	۴	۸	S	مستطیل		
خانه عرب کرمانی	۱۷۰۰	۲	۳۸	۱	۴	۱۵	S	مستطیل		
خانه عرب‌ها	۱۵۰۰	۱	۳۴	۲	۴	۱۱	MW	مربع مستطیل		
خانه علوم‌ها	۱۳۰۰	۲	۲۵	۱	۴	۸	S	مستطیل		
خانه فاتح‌ها	۱۷۰۰	۲	۴۲	۱	۴	۱۵	S	مستطیل		
خانه فرهنگی و مظفری	۱۷۰۰	۲	۴۲	۲	۴	۱۵	S	مستطیل		
خانه کراوغلی	۱۸۰۰	۲	۴۰	۲	۴	۹	S	مستطیل		
خانه گرامی	۱۹۰۰	۲	۳۰	۲	۴	۹	S	مستطیل		
خانه گلشن (هتل لاله)	۱۸۰۰	۲	۴۲	۱	۴	۸	S	مستطیل		
خانه مستر وای (Mr. Wye)	۱۷۰۰	۲	۴۲	۱	۴	۱۵	S	مستطیل		

گونه مستقیم	گونه پیوسته	گونه موازی	گونه ترکیبی
			
دیاگرام			
جریان هوا از بادگیر مستقیم به سمت اتاق‌های اطراف وارد می‌شود.	جریان هوا در اتاق‌های به هم متصل جریان می‌یابد.	جریان هوا از طریق راهرویی موازی با اتاق‌ها همانند یک کانال هوا باعث تهویه اتاق‌ها می‌شود.	جریان هوا در هشتی بین فضاها و راهروهای مختلف، که به نقاط دیگر پلان راه دارند، تقسیم می‌شود.
شرح			
موارد			
طباطبایی‌ها، عطارها، اردکانیان، علوم‌ها، کراوغلی	تهامی، عطارها، لاری‌ها، آقازاده، رسولیان، اخوان سیگاری، سمسار، شفیع‌پور، علیرضا عرب، فاتح‌ها، فرهنگی و مظفری، گلشن، مستر وای.	رسولیان، اخوان سیگاری، علاق‌بند، آقازاده، علیرضا عرب، باکوچی، تهامی، مرتاضیون، اخوان سیگاری، روحانیان، ریسمانیان، عرب‌ها، گرامی.	بروجردی‌ها، مرتاضیون، ریسمانیان، علیرضا عرب، فرهنگی و مظفری، عرب کرمانی، عرب‌ها، گلشن، رسولیان

جدول ۲. چهار گونه الگوی حرکت جریان هوا مستخرج از گونه‌شناسی، تدوین و نام‌گذاری: نگارندگان.

37. H. Liu, et al., "Study on Ventilation of Indoor Substation Main Transformer Room Based on COMSOL Software", in 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), 2017.

38. A. Alvarado, et al., "Modeling the Hygrothermal Behavior of Green Walls in COMSOL Multiphysics: Validation against Measurements in a Climate Chamber", *Building and Environment*, 2023, 238.

۴. نمونه موردی مطالعاتی: خانه رسولیان

همان‌طور که مشاهده شد از میان ۲۱ خانه سنتی بررسی‌شده در استان یزد، به‌صورت تصادفی خانه رسولیان نمونه مناسب تشخیص و برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. این خانه دوطبقه با ۱۵۰۰ متر مربع مساحت و ۱۰ اتاق، دارای ۲ بادگیر است که در قسمت جنوبی و غربی پلان قرار گرفته‌اند. همچنین هرکدام



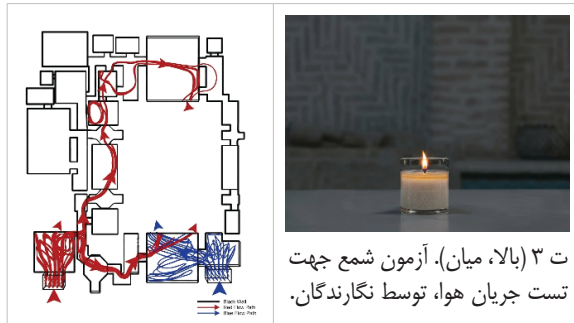
ت ۱. نمودار فراوانی گونه‌های جریان هوا در نمونه‌های بررسی شده، تدوین: نگارندگان.

از این بادگیرها ۱۰ و ۱۲ متر ارتفاع دارند.^{۴۴} جهت باد غالب در ایستگاه یزد به‌ترتیب فراوانی، غربی، شمال غربی، و جنوب شرقی مشخص شده که در تابستان ۱۴۰۲ غربی - شمال غربی بوده و ۱۷٪ از کل بادها در این جهت بوده است. بیشینه سرعت باد ثبت‌شده در این ایستگاه در همان زمان برابر با ۱۶ متر بر ثانیه و در جهت ۳۴۰ درجه بوده است.^{۴۵}

برای آزمودن جریان هوا در محیط خانه رسولیان که امروزه مکان دانشکده معماری و شهرسازی است، و سنجش میزان پوشش‌دهی تهویه طبیعی در نقاط دورتر نسبت به اتاق بادگیر، آزمایش شمع^{۴۶} در مردادماه سال ۱۴۰۲ در یکی از کلاس‌های بخش شمالی پلان اجرا شد. طبق «ت ۳»، دود حاصل از شعله شمع در این محیط ثابت ماند و تأثیر تهویه در این محیط مشاهده نشد. در ادامه فضای منفی این خانه بدون هیچ مداخله‌ای به‌صورت سه‌بعدی با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است که در «ت ۴» می‌توان نتایج آن را مشاهده کرد. در این تصویر رنگ



ت ۴ (بالا، چپ). پلان شبیه‌سازی عملکرد بادگیر و مشخص کردن مسیرهای جریان هوا در خانهٔ رسولیان قبل از اجرای مداخلات. طرح: نگارندگان.



ت ۳ (بالا، میان). آزمون شمع جهت تست جریان هوا، توسط نگارندگان.



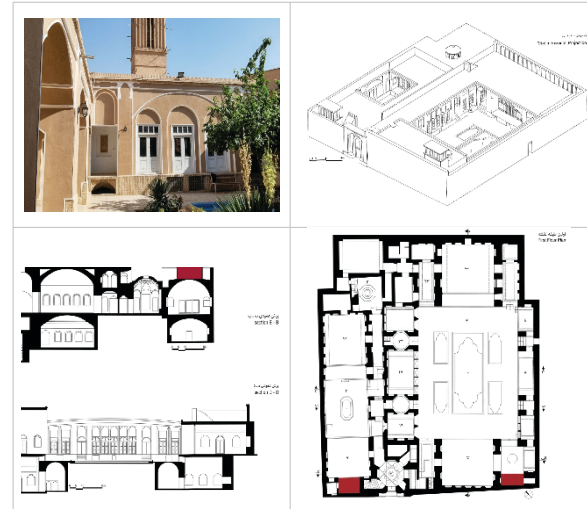
۵. شرایط مرزی

به‌منظور شبیه‌سازی تهویهٔ طبیعی خانهٔ رسولیان، هندسهٔ فضای منفی آن مدل‌سازی شده است. همچنین جهت برخورد باد به برج بادگیر برای محاسبهٔ دقیق‌تر و حذف متغیر زاویه، ۹۰ درجه با شدت جریان آرام در نظر گرفته شده است. در «ت ۵» قسمت قرمز بخش ورودی جریان هوا و بخش آبی خروجی جریان هوا در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی نرم‌افزار COMSOL به‌منظور مدل‌سازی‌های هندسی و ایجاد شبکه‌بندی استفاده شده است. بدین ترتیب شبکه‌بندی هندسهٔ مد نظر به‌صورت مش‌بندی نامنظم، با دیواره‌های ساکن و شرایط بدون لغزش ساخته شده است. شبکهٔ ایجادشده در این

ت ۵ (پایین، راست). شرایط مرزی شبیه‌سازی خانهٔ رسولیان بدون مداخله، ترسیم: نگارندگان.



ت ۶ (پایین، چپ). دیاگرام مش‌بندی پروژه به‌صورت مش‌بندی بدون سازمان (Unstructured mesh)، ترسیم: نگارندگان.



ت ۲ (بالا، راست). تصویر، نمای سه‌بعدی، نما و پلان خانهٔ رسولیان یزد، مأخذ:

K. Haji-Ghasemi, *Treasury of Yazd Traditional Houses*, Shahid Beheshti University Press, First Edit, pp. 41-49, 2004. (In Persian)

آبی نشانگر هوای ورودی از بادگیر سمت راست پلان، و رنگ قرمز نشانگر هوای ورودی از بادگیر سمت چپ پلان است. مسیر گردش جریان هوا نیز با فلش‌هایی روی تصویر مشخص شده است که نشان می‌دهد جریان هوا از هردو بادگیر عملاً در اکثر نقاط خانه جریان ندارد و در عملکرد تهویهٔ طبیعی مؤثر نیست. کازمی و اکبریان نیز در پژوهشی در مورد رفتار حرارتی اتاق بادگیر خانهٔ رسولیان مشخص کردند که تهویهٔ طبیعی در این بنا کافی نیست و برای ایجاد تهویهٔ مناسب استفاده از روش‌های مکانیکی را پیشنهاد کرده‌اند.^{۴۷} با توجه به موارد ذکرشده، می‌توان نتیجه گرفت که گردش جریان هوا در شرایط کنونی خانهٔ رسولیان ناکارآمد بوده و نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در بهبود وضعیت مؤثر باشد.

پیش رو اندازه و محل بازشوها در پلان ثابت بوده که در «ت» و «جدول ۵» قابل مشاهده هستند.

جدول ۳. شرایط مرزی و داده‌های ورودی نرم‌افزار، تنظیم و تدوین: نگارندگان.

متغیر	مقدار
جهت باد	۳۴۰ درجه
سرعت باد	۱۶ متر بر ثانیه
زاویه برخورد باد به بادگیر	۹۰ درجه
میزان جریان هوای ورودی	۰/۰۱۵ متر مکعب بر ثانیه
دبی	۰/۰۳ متر مکعب بر ثانیه
فشار هوا در بالای برج بادگیر	۹۹۶۵۲ پاسکال
فشار هوا در پایین ترین نقطه	۱۰ پاسکال

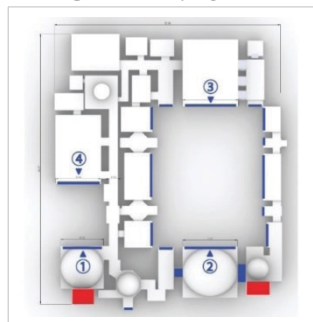
جدول ۴. مقیاس و اندازه‌های مدل، تنظیم و تدوین: نگارندگان.

شرح	مقدار
مقیاس مدل	۱:۲۵
ارتفاع بادگیرها	۹ متر
ابعاد بادگیرها	۳/۲۰ * ۱/۸۴ - ۲/۸۶ * ۲ متر
عرض راهروها	۱/۲۰ متر
عرض ورودی اتاق‌ها	۱/۱۰ متر
زیربنای تمام مدل‌ها	۱۵۰۰ متر مربع

ت ۹ (پایین، راست). بازشوهای شماره‌گذاری شده محل خروج جریان هوا هستند، طرح: نگارندگان.

جدول ۵. ابعاد بازشوهای در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی. تنظیم: نگارندگان.

شماره بازشو	اندازه (متر)
۱	۵/۷۹
۲	۷/۳۷
۳	۷/۴۸
۴	۶/۱۴



ت ۸ (بالا، چپ). نمودار مقایسه سرعت جریان هوا در کانال‌های بادگیر با زاویه ۹۰ درجه برخورد باد به برج بادگیر برای استفاده از نتایج در پژوهش حاضر،

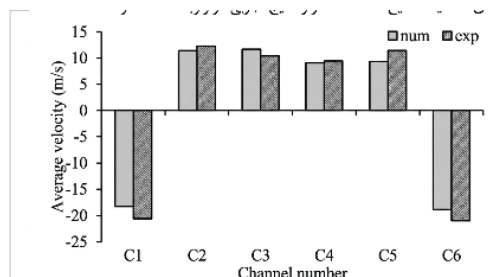


Fig. 7 Comparison of current study and experiment results in 90° wind incident angel

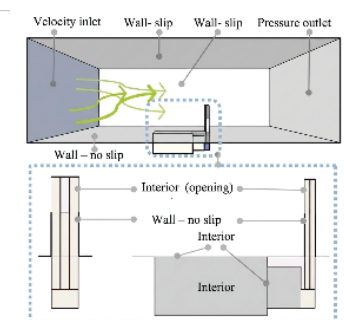


Fig. 2 boundary conditions

پژوهش مانند پژوهش‌های مشابه، با روش مثلث‌بندی دیپلانی^{۴۸} — به دلیل سادگی در ایجاد شبکه‌های پیچیده و قابلیت تطبیق سریع روی بدنه — اجرا شده و همه هندسه شبیه‌سازی شده با مثلث‌های نامنظم به گونه‌ای که از هر گوشه به یکدیگر متصل هستند پوشیده شده است. همچنین تحلیل شبکه با معادله $k - \epsilon$ RANS SST اجرا شده است.

به منظور اعتباربخشی اطلاعات ورودی در شبیه‌سازی‌های انجام شده، به نتایج تحقیقی با تحلیل عددی عملکرد بادگیر چهارجهته متصل به تالار و حیاط مرکزی اتکا شده است (شکل ۷ و ۸). در این تحقیق مدلی با مقیاس ۱:۲۵ در سیزده زاویه حمله تحت آزمایش‌های تجربی با تونل باد و شبیه‌سازی با روش CFD و معادلات عددی انجام شده و پارامترهای دبی و جهت جریان هوا بررسی شده‌اند.^{۴۹} با توجه به حذف پارامتر زاویه وزش باد به برج بادگیر در پژوهش حاضر، تنها از اطلاعات مرتبط با زاویه وزش ۹۰ درجه استفاده شده است.

شرح شرایط مرزی، جزئیات اطلاعات ورودی شبیه‌سازی در «جدول ۳» قرار داده شده است. «جدول ۴» حاوی مقیاس و اندازه‌های مدل‌سازی انجام شده از خانه رسولیان به منظور اجرای شبیه‌سازی تهویه طبیعی است. در همه ۴ شبیه‌سازی

ت ۷ (بالا، راست). شرایط مرزی پژوهش مشابه.

مأخذ ت ۷ و ۸:

M. Kazemi, M. Akbarian, Studying the thermal behavior of the cellars of traditional houses in Yazd and suggestions for its optimal condition, First Architecture and Sustainable Urban Spaces Conference, Iran, 2013.

42. U.S. Validation Services Inc, "Airflow Visualization Test", 2024. https://usvalidation.com/kb/eq_bsc_lfh_smoke_test.aspx

۴۳. ال. وی. دی. گروت، روش‌های تحقیق در معماری، ترجمه علی‌رضا عینی‌فر (تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۲).

۴۴. کامبیز حاجی قاسمی، گنجینه خانه‌های سنتی یزد (تهران: انتشارات دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۸۳)، ۴۱-۴۹.

۱.۶. روش حل

در پژوهش حاضر به منظور انجام محاسبات و تحلیل رفتار جریان هوا از نرم افزار COMSOL Multiphysics استفاده شده است، برای گسسته سازی معادلات از روش حجم محدود در ترکیب با مدل آشفتگی SST - $k - \epsilon$ و برای گسسته سازی عبارات جابه جایی از روش بالادست مرتبه دوم و برای تصحیح کوپلینگ بین فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده شده است.

۲.۶. محاسبه فشار در بالای برج بادگیر

از آنجاکه شبیه سازی انجام شده بر اساس تفاوت فشار است، باید فشار در بالای برج بادگیر و فشار در طبقه همکف مشخص باشد. فشار بر روی زمین ثابت است، بنابراین بر اساس ارتفاع بادگیر، فشار بالای برج بادگیر را محاسبه می کنیم. در معادله زیر v_2^2 تأثیر سرعت باد و h تأثیر ارتفاع است.

$$\rho_{1+1/2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = \rho_{2+1/2} \rho v_2^2 + \rho g h$$

$$\rho_1 = 10 p_a \quad ۱. \text{ حیاط}$$

۲. بالای بادگیر:

$$10^5 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho_1 g h_1 = \rho_2 + \frac{1}{2} \rho (20)^2 + \rho g h$$

$$10^5 = \rho_2 + \frac{1}{2} \times 1,16 \times 400 + 1,16 \times 10 \times 10$$

$$10^5 = \rho_2 + 232 + 116 \Rightarrow \rho_2 = 99652. \text{ پاسکال}$$

۶. معادلات حاکم

بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho u) = 0$$

در رابطه بالا ρp چگالی و u بردار سرعت هستند. بقا مومنتوم:

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \times (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \times (u \nabla u) - \nabla \times \tau_e$$

در معادله فوق p فشار، g بردار شتاب گرانشی، μ لزجت دینامیکی و τ_e تانسور تنش های آشفتگی یا تنش های رینولدز در اثر نوسانات سرعت هستند. در معادلات بقای مومنتوم، مقادیر نوسانی به شکل مجهول جدید و با عنوان تنش های رینولدز در معادلات وارد می شوند که اثرات آنها باید توسط مدل های آشفتگی مشخص شوند. گونه ای از انواع آشفتگی مشهور مدل آشفتگی SST - $k - \epsilon$ است که به سبب دقت مناسب در شبیه سازی لایه مرزی، به دلیل وجود دیواره های زیاد در مدل و همچنین پیش بینی جدایش جریان، انتخاب شده و با معادلات کمکی بعدی معرفی می شود.

انرژی جنبشی آشفتگی:

رابطه ۳:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \times (\rho k u) = \nabla \times (\Gamma_k \nabla k) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k$$

نرخ انتشار آشفتگی:

رابطه ۴:

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \times (\rho \omega u) = \nabla \times (\Gamma_\omega \nabla \omega) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

در این معادلات $\tilde{G}_k$ نشانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی در اثر گرادیان های سرعت متوسط است. $\tilde{G}_\omega$ نشانگر عبارت تولید و ترم های k و ω به ترتیب ضرایب پخش مؤثر k و ω هستند، Y_k و Y_ω به ترتیب بیانگر عبارات استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی، k استهلاک مخصوص، ω هستند و D_ω نشانگر نفوذ عرضی است. عبارات S_k و S_ω ترم های چشمه هستند که در صورت لزوم کاربر آنها را تعیین می کند.^{۵۰}

۴۵. سازمان هواشناسی ایران، فصلنامه هواشناسی استان یزد: بولتن بایگانی شده، فصلنامه تابستان، ش. ۲ (۲۰۲۳): ۱۴-۳.

46. U.S. Validation Services Inc, "Airflow Visualization Test", 2024. https://usvalidation.com/kb/eq_bsc_lfh_smoke_test.aspx

۴۷. کاظمی و اکبریان، «مطالعه رفتار حرارتی سرداب های خانه های سنتی یزد و ارائه پیشنهادهایی برای وضعیت بهینه آن».

48. Delaunay

۴۹. دهقانی و همکاران، «تحلیل عددی عملکرد بادگیر چهار طرفه متصل به تالار و حیاط در زوایای مختلف وزش باد»، ۱۲۵-۱۳۴.

۵۰. همان.

۷. شبیه‌سازی با روش CFD طبق ۴ گونه الگوی جریان هوا

برای تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در کالبد مجموعه، بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی ضروری است. در این پژوهش (مطابق پیشینه‌اش) روش CFD برای انجام محاسبات، و نرم‌افزار COMSOL ابزار شبکه‌بندی و شبیه‌سازی جریان هوای داخلی مجموعه بوده است. سرعت باد ۱۶ متر بر ثانیه و زاویه برخورد جریان باد به برج بادگیر، بر اساس نتایج مورد اتکا بر تحقیقات تجربی، ۹۰ درجه انتخاب شده است. شبیه‌سازی جریان هوا در این پژوهش بر اساس تفاوت فشار هوا صورت گرفته که فشار کل ۱۰۰۰۰ پاسکال، فشار قسمت‌های ورودی فشار اتمسفریک، و فشار بالای برج بادگیر طبق محاسبه ۹۹۶۵۰ به‌دست آمده است.

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، مشخص شد در مسیر انتقال جریان باد از اتاقک بادگیر به فضاهای دیگر خانه چندین مانع هست که با حذف آنها گردش هوا به‌راحتی می‌تواند مسیر کل خانه را با سرعت بالاتری طی کند و نتیجه مساعدتری نسبت به قبل حاصل شود. سه مورد از این موانع که گردش جریان هوا از اتاقک بادگیر به فضاهای دیگر مجموعه را با اختلال مواجه کرده بود، شناسایی و اصلاح شد. بعد از شبیه‌سازی و با توجه به معادلات عددی مشخص شد که تغییرات میزان گردش جریان هوا در پلان به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و پوشش‌دهی بالاتری را ایجاد کرده است.

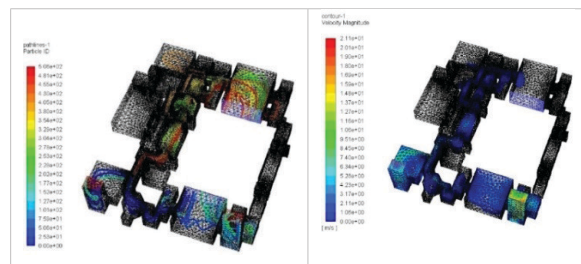
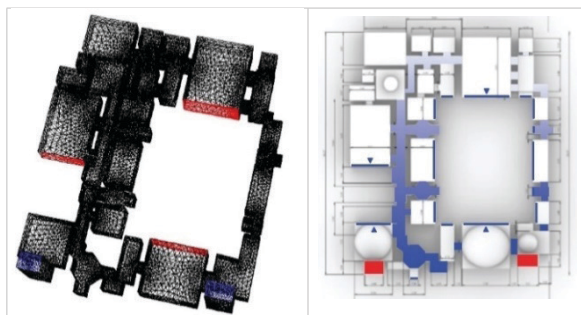
۷.۱. شبیه‌سازی خانه رسولیان - گونه ترکیبی

طبق گونه‌شناسی انجام‌شده، یکی از موارد استخراج‌شده الگوی جریان هوای ترکیبی است. خانه رسولیان که به‌صورت تصادفی برای اجرای شبیه‌سازی‌ها و مقایسه عملکرد این ۴ گونه انتخاب شده، به‌صورت سنتی خود این خانه دارای این الگوی جریان

هواست و نیازی به اجرای مداخلات نبوده است. بنابراین وضع حاکم بر خانه رسولیان را برای بررسی سرعت، نحوه گردش، و میزان جریان هوا مدل‌سازی و شبیه‌سازی کردیم (ت ۱۱ تا ۱۳). طبق «جدول ۶» که بر اساس «ت ۱۴» به‌دست آمده، در گونه ترکیبی بیشینه سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه بوده که در پایان مسیر به ۱۰/۲۰۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.

ت ۱۱ (بالا، چپ) مدل سه‌بعدی مش‌بندی نمونه موردی به روش مش‌بندی نامنظم با مشخص شدن محل‌های ورود و خروج جریان هوا، ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۰ (بالا، راست) پلان مدل‌سازی فضای منفی خانه رسولیان بدون مداخله، ترسیم: نگارندگان.



ت ۱۳ (پایین، چپ). مدل کانتور (Contour) سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانه رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونه ترکیبی، ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۲ (پایین، راست). مدل سه‌بعدی مسیر جریان (Path line) هوا، ترسیم: نگارندگان.



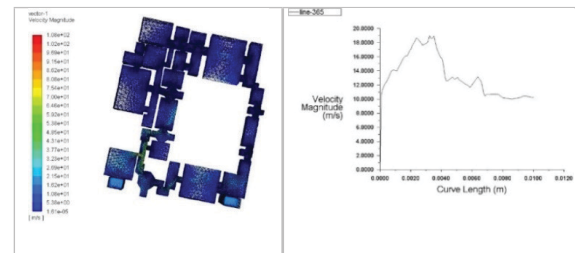
جدول ۶ اطلاعات خروجی از «ت ۱۳»، میزان سرعت باد در هر نقطه از مسیر باد در شبیه‌سازی گونه ترکیبی خانه رسولیان، تنظیم: نگارندگان.

طول مسیر جریان باد (m)	سرعت باد (m/s)
۰/۰۰۰۰	۱۱/۰۰۰۰
۰/۰۰۱۰	۱۴/۰۰۰۰
۰/۰۰۲۰	۱۶/۰۰۰۰
۰/۰۰۳۰	۱۸/۰۰۰۰
۰/۰۰۴۰	۱۶/۰۰۰۰
۰/۰۰۵۰	۱۳/۰۰۰۰
۰/۰۰۶۰	۱۲/۰۰۰۰
۰/۰۰۷۰	۱۱/۰۰۰۰
۰/۰۰۸۰	۱۰/۰۰۰۰
۰/۰۰۹۰	۱۰/۵۰۰۰
۰/۰۱۰۰	۱۰/۲۰۰۰

(ت ۱۶ تا ۱۹). طبق این گونه، جریان هوا از طریق راهرویی در پلان پخش می‌شود و به‌صورت مستقیم بدون واسطه به سمت هر اتاق انتقال می‌یابد. شبیه‌سازی با روش CFD در نرم‌افزار COMSOL به‌خاطر مشاهده میزان عملکرد گونه مستقیم در سرعت و انتقال جریان هوا در پلان انجام شده است. طبق «جدول ۷» که بر اساس «ت ۲۰» به دست آمده، در گونه مستقیم نیز بیشینه سرعت باد ۱۸ متر بر ثانیه است که در پایان مسیر به ۱۰/۵۰۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد که با توجه به گونه ترکیبی، اندکی افزایش یافته است.

ت ۱۹ (میان، چپ). مدل سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانه رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونه مستقیم، ترسیم: نگارندگان.

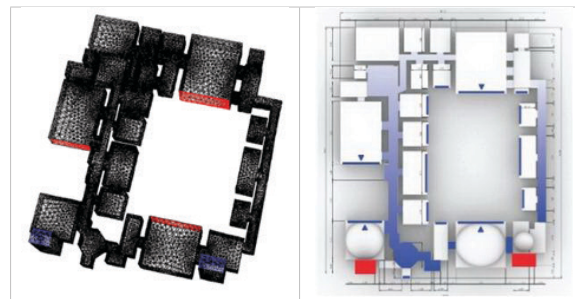
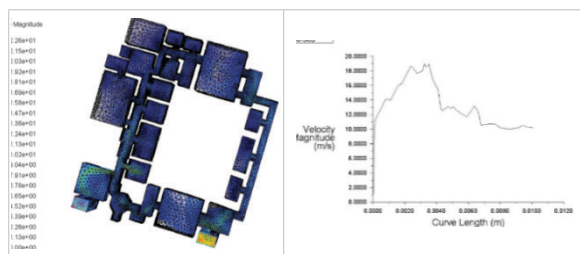
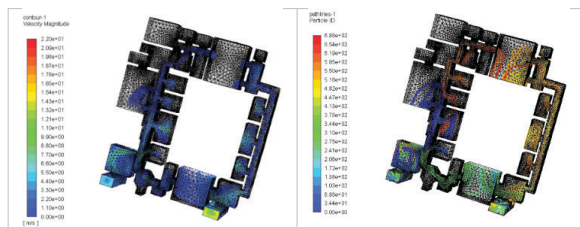
ت ۱۸ (میان، راست). مدل سه‌بعدی مسیر جریان هوا، ترسیم: نگارندگان.



ت ۱۴ (بالا، راست). نمودار خطی میزان دقیق سرعت جریان هوا در هر بخش از مسیر، ترسیم: نگارندگان.

۲.۷. شبیه‌سازی خانه رسولیان - گونه مستقیم

طبق یافته‌های به‌دست‌آمده از گونه‌شناسی انجام‌شده که در «جدول ۲» نشان داده شده، یکی دیگر از الگوهای انتقال جریان هوا الگوی مستقیم است. با اجرای مداخلاتی اندک در مدل سه‌بعدی خانه رسولیان، الگوی انتقال جریان هوا در این نمونه موردی به گونه مستقیم تغییر یافته است



طول مسیر جریان باد (m)	سرعت باد (m/s)
۰/۰۰۰۰	۱۱/۰۰۰۰
۰/۰۰۱۰	۱۴/۰۰۰۰
۰/۰۰۲۰	۱۶/۲۰۰۰
۰/۰۰۳۰	۱۸/۰۰۰۰
۰/۰۰۴۰	۱۵/۸۰۰۰
۰/۰۰۵۰	۱۳/۰۰۰۰
۰/۰۰۶۰	۱۲/۱۰۰۰
۰/۰۰۷۰	۱۰/۹۰۰۰
۰/۰۰۸۰	۱۰/۵۰۰۰
۰/۰۰۹۰	۱۰/۱۰۰۰
۰/۰۱۰۰	۱۰/۵۰۰۰

جدول ۷. اطلاعات خروجی از «ت ۲۰»، میزان سرعت باد در هر نقطه از مسیر باد در شبیه‌سازی گونه مستقیم خانه رسولیان، تنظیم: نگارندگان.

ت ۲۱ (پایین، چپ). مدل وکتور سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانه رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونه مستقیم، ترسیم: نگارندگان.

ت ۲۰ (پایین، راست ۳) نمودار خطی میزان دقیق سرعت جریان هوا در هر بخش از مسیر، ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۷ (پایین، راست ۲). مش‌بندی نامنظم با مشخص شدن محل‌های ورود و خروج جریان هوا با رنگ آبی و قرمز، ترسیم: نگارندگان.

ت ۱۶ (پایین، راست ۱). پلان خانه رسولیان با الگوی جریان هوا طبق گونه مستقیم، ترسیم: نگارندگان.

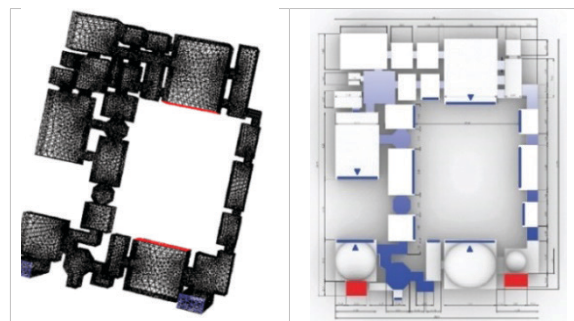
۳.۷. شبیه‌سازی خانهٔ رسولیان - گونهٔ پیوسته

طبق «جدول ۲» دومین گونهٔ انتقال جریان هوا در حالتی است که فضاهای مختلف پلان به‌طور پیوسته به هم متصل هستند و جریان هوا از فضایی به فضای دیگر منتقل می‌شود. گونهٔ پیوسته کمترین مانع ممکن در مسیر جریان هوا را ایجاد

ت ۲۳ (بالا، راست ۲).

مش‌بندی مدل به روش نامنظم با مشخص شدن محل‌های ورود و خروج جریان هوا با رنگ آبی و قرمز، ترسیم: نگارندگان.

ت ۲۲ (بالا، راست ۱). پلان خانهٔ رسولیان با الگوی جریان هوا طبق گونه‌ی پیوسته، ترسیم: نگارندگان.

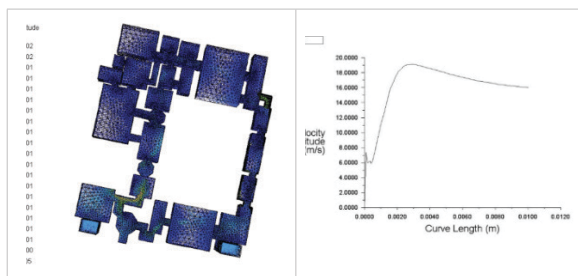


می‌کند. در این گونه طبق «جدول ۸» که بر اساس «ت ۲۶» به‌دست آمده، در گونهٔ پیوسته بیشینهٔ سرعت باد ۱۹ متر بر ثانیه است که در پایان مسیر به ۱۶ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد، همچنین در گونهٔ پیوسته بیشترین مقدار سرعت باد را در همهٔ طول مسیر مشاهده می‌کنیم.

ت ۲۷ (بالا، چپ) مدل وکتور

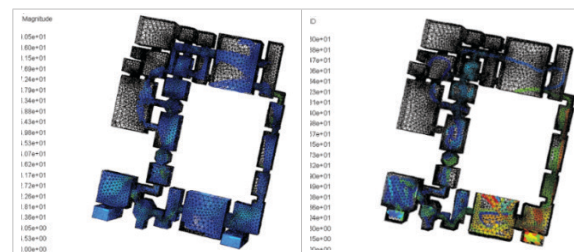
سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانهٔ رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونهٔ پیوسته، ترسیم: نگارندگان.

ت ۲۶ (بالا، راست ۳). نمودار خطی میزان دقیق سرعت جریان هوا در هر بخش از مسیر، ترسیم: نگارندگان.



۴.۷. شبیه‌سازی خانهٔ رسولیان - گونهٔ موازی

گونهٔ آخر از انواع الگوهای جریان هوا در خانه‌های سنتی یزد، طبق «جدول ۲»، در شرایطی دیده می‌شود که جریان هوا در راهرویی موازی با اتاق‌ها انتقال می‌یابد و به‌صورتی غیرمستقیم وارد اتاق‌های به هم پیوسته می‌شود. تأثیر این الگو با شبیه‌سازی به روش CFD در نرم‌افزار COMSOL مشاهدهٔ میزان تفاوت در سرعت و انتقال جریان هوا در پلان بررسی شده است. طبق «جدول ۹» که بر اساس «ت ۳۲» به‌دست آمده، در گونهٔ موازی بیشینهٔ سرعت باد در بیشترین حالت از بین ۴ گونه و برابر ۱۹/۵ متر بر ثانیه است که در پایان مسیر به ۱۰/۵۰۰ متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.



ت ۲۵ (پایین، چپ). مدل کانتور سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانهٔ رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونهٔ پیوسته، ترسیم: نگارندگان.

ت ۲۴ (پایین، راست). مدل سه‌بعدی مسیر جریان هوا، ترسیم: نگارندگان.

طول مسیر جریان باد (m)	سرعت باد (m/s)
۰/۰۰۰۰	۷/۲۰۰۰
۰/۰۰۱۰	۱۱/۰۰۰۰
۰/۰۰۲۰	۱۸/۰۰۰۰
۰/۰۰۳۰	۱۹/۰۰۰۰
۰/۰۰۴۰	۱۸/۵۰۰۰
۰/۰۰۵۰	۱۸/۰۰۰۰
۰/۰۰۶۰	۱۷/۵۰۰۰
۰/۰۰۷۰	۱۷/۰۰۰۰
۰/۰۰۸۰	۱۶/۵۰۰۰
۰/۰۰۹۰	۱۶/۲۰۰۰
۰/۰۱۰۰	۱۶/۰۰۰۰

جدول ۸. اطلاعات خروجی از «ت ۲۵»، میزان سرعت باد در هر نقطه از مسیر باد در شبیه‌سازی گونهٔ پیوستهٔ خانهٔ رسولیان. تنظیم: نگارندگان.

۸. یافته‌های پژوهش

۴ الگوی غالب جریان هوا (مستقیم، پیوسته، موازی، و ترکیبی) که حاصل گونه‌شناسی ۲۱ نمونه خانه سنتی بادگیردار در شهر یزد هستند، در مدل سه‌بعدی خانه رسولیان اجرا و با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا میزان تأثیرگذاری هریک بررسی شود. در بخش نتایج شبیه‌سازی، مسیر جریان هوا در هر گونه به‌صورت مدل سه‌بعدی (وکتور و کانتور) ارائه شده است. همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های سه‌بعدی، نمودار سرعت جریان هوا در هر نقطه از طول مسیر (میزان سرعت بر مسافت طی‌شده جریان) در نظر گرفته شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده از «جدول‌های ۶ تا ۹»، بیشینه سرعت باد در گونه‌های ترکیبی، مستقیم، پیوسته، و موازی به‌ترتیب ۱۸، ۱۸، ۱۹، و ۱۹/۵ متر بر ثانیه است. همچنین سرعت جریان هوا در پایان مسیر ۱۰/۲، ۱۰/۵، ۱۶، و ۱۰/۵ متر بر ثانیه است.

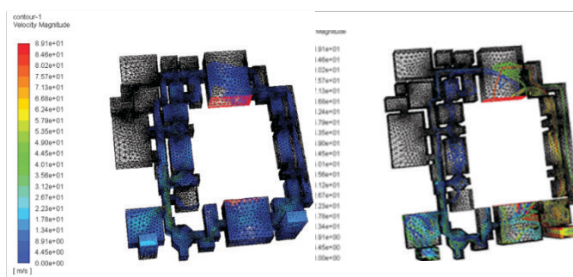
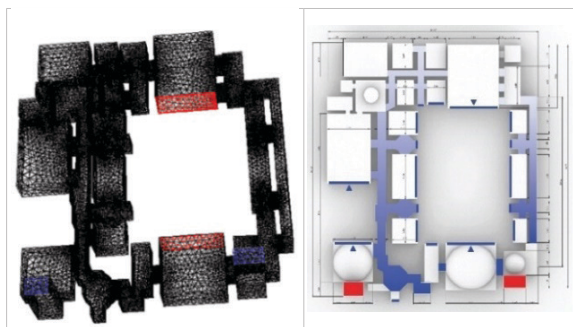
نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به بررسی عملکرد انواع گونه‌های انتقال جریان هوا در خانه‌های سنتی یزد با هدف بهبود میزان سرعت و جریان هوا اختصاص دارد. برای نیل به این هدف، ۲۱ مورد از خانه‌های سنتی یزد با عنوان جامعه آماری و به‌صورت تصادفی انتخاب شدند و طی گونه‌شناسی خلاصه‌شده در «جدول ۲» از نظر ویژگی‌های ساختاری تحلیل گردیده‌اند. در نتیجه این بررسی‌ها مشخص شد که الگوهای انتقال جریان هوا در تهویه طبیعی خانه‌های سنتی بادگیردار یزد در ۴ نوع اصلی مستقیم، پیوسته، موازی، و ترکیبی دسته‌بندی می‌شوند که فراوانی هر کدام در «جدول ۳» قابل مشاهده است. طبق «جدول ۲»،

ت ۳۳ (پایین، چپ). مدل وکتور سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانه رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونه موازی، ترسیم: نگارندگان.

ت ۲۹ (بالا، چپ). مش‌بندی مدل به روش نامنظم با مشخص شدن محل‌های ورود و خروج جریان هوا با رنگ آبی و قرمز، ترسیم: نگارندگان.

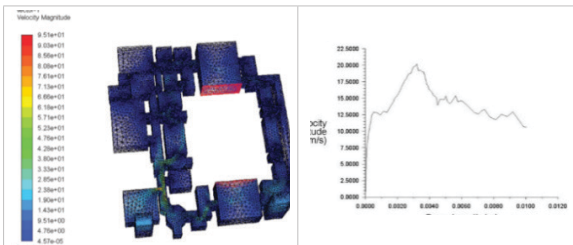
ت ۲۸ (بالا، راست). پلان خانه رسولیان با الگوی جریان هوا طبق گونه موازی، ترسیم: نگارندگان.



ت ۳۰ (میان، راست). مدل سه‌بعدی مسیر جریان هوا، ترسیم: نگارندگان

ت ۳۱ (میان، چپ). مدل کانتور سه‌بعدی میزان سرعت جریان هوا در خانه رسولیان بعد از اجرای مداخلات طبق گونه موازی، ترسیم: نگارندگان.

ت ۳۲ (پایین، راست). نمودار خطی میزان دقیق سرعت جریان هوا در هر بخش از مسیر، ترسیم: نگارندگان.



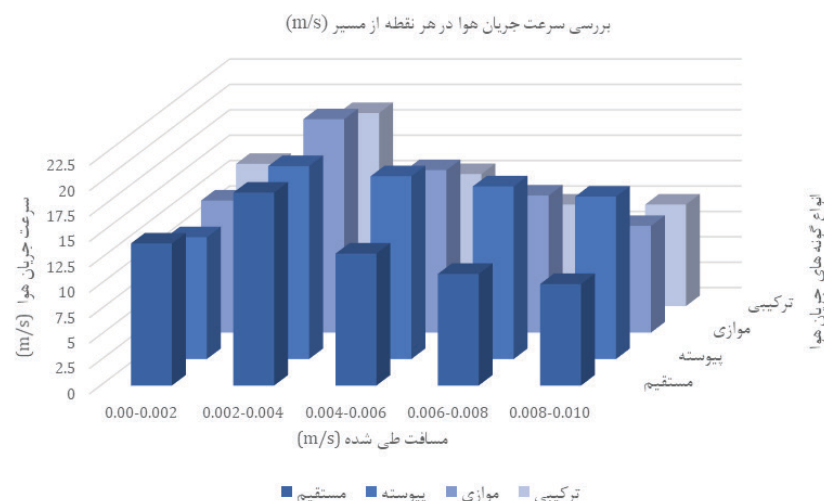
سرعت باد (m/s)	طول مسیر جریان باد (m)
۷,۵۰۰	۰/۰۰۰
۱۲,۵۰۰	۰/۰۰۱۰
۱۵,۵۰۰	۰/۰۰۲۰
۱۹,۵۰۰	۰/۰۰۳۰
۱۶,۵۰۰	۰/۰۰۴۰
۱۵,۵۰۰	۰/۰۰۵۰
۱۴,۵۰۰	۰/۰۰۶۰
۱۳,۰۰۰	۰/۰۰۷۰
۱۲,۰۰۰	۰/۰۰۸۰
۱۳,۰۰۰	۰/۰۰۹۰
۱۰,۵۰۰	۰/۰۱۰۰

جدول ۹. اطلاعات خروجی از «ت ۳۱»، میزان سرعت باد در هر نقطه از مسیر باد در شبیه‌سازی گونه موازی خانه رسولیان. تنظیم: نگارندگان.

ت ۳۴. مقایسه عملکرد هر گونه بر اساس میانگین سرعت در هر نقطه از طول جریان هوا، ستون نمودار نشانگر سرعت باد (متر بر ثانیه) و سطر نمودار نشانگر مسیر جریان هوا (متر) است، تدوین: نگارندگان.

در گونه مستقیم انتقال جریان هوا از طریق راهرویی که از مجاورت اتاق‌ها می‌گذرد و به هریک به‌صورت مستقیم راه می‌یابد، صورت می‌پذیرد. گونه پیوسته حالتی است که اتاق‌ها از طریق یک راهرو به یکدیگر متصل می‌شوند و خود در نقش مسیری جهت انتقال جریان هواست. در گونه موازی نیز راهرویی به‌صورت موازی در راستای اتاق‌ها قرار گرفته و انشعابات از آن بینابین هردو اتاق اجرا می‌شوند که هم به اتاق‌ها راه می‌یابند و هم آنها را به هم متصل می‌کند؛ در این شیوه جریان هوا از راهروی موازی به‌صورت غیرمستقیم

انتقال می‌یابد. گونه ترکیبی نیز به حالتی گفته می‌شود که در پلان به‌دلیل گستردگی و یا چیدمان متفاوت فضاها، به انتخاب سازنده، هم‌زمان از دو روش موازی و پیوسته استفاده شده است. برای بررسی عملکرد هر کدام از این الگوها، خانه رسولیان با عنوان نمونه موردی تصادفی به‌منظور مدل‌سازی الگوها با شرایط مرزی یکسان و کمترین مداخله ممکن انتخاب شد. تحلیل و مقایسه نمودارهای بزرگ‌نمایی‌شده از سرعت جریان هوا در هر نقطه از مسیر در «ت ۱۴، ۲۰، ۲۶، و ۳۲» مشخص می‌کند که گونه‌های ترکیبی و مستقیم نتایج بسیار مشابهی داشته‌اند و تفاوت زیادی از نظر سرعت جریان هوا در هر نقطه از مسیر و همچنین الگوی انتقال آن ایجاد نشده است. همچنین با توجه به اطلاعات خلاصه‌شده در «جدول ۶، ۷، ۸، و ۹» می‌توان به این نتیجه دست یافت که الگوی موازی بیشترین بیشینه سرعت جریان هوا را با ۱۹٫۵ متر بر ثانیه داشته است. باوجوداینکه بیشترین بیشینه سرعت جریان هوا متعلق به الگوی موازی است، با نگاهی به «ت ۲۶ و ۳۲» که نمودارهای سرعت جریان هوا در هر نقطه از مسیر هستند، می‌توان دریافت که الگوی پیوسته برخلاف الگوی موازی در همه طول مسیر سرعت بالای جریان هوا را حفظ کرده است و در پایان مسیر نیز بالاترین سرعت جریان هوا یعنی ۱۶ متر بر ثانیه را داراست. بنابراین الگوی پیوسته سرعت بالای جریان



گونه ترکیبی	گونه موازی	گونه پیوسته	گونه مستقیم

جدول ۱۰. چهار گونه غالب الگوی حرکت جریان هوا در خانه‌های سنتی بادگیردار یزد، تدوین: نگارندگان.

فهرست علائم

g	شتاب گرانشی (m^{-2})
H	ارتفاع (m)
I	شدت آشفستگی
ij	جهت‌های مختلف مختصاتی
k	انرژی جنبشی آشفستگی
L	طول (m)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
P_t	فشار کل ($kgm^{-1}s^{-2}$)
P_s	فشار استاتیک ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Re	عدد رینولدز
u	بردار سرعت (ms^{-1})
V	اندازه سرعت (ms^{-1})
W	عرض (m)

علائم یونانی

Γ	ضریب پخش
Γ_k	ضریب پخش مؤثر k
Γ_ω	ضریب پخش مؤثر ω
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ_t	تانسور تنش‌های آشفستگی
ω	فرکانس آشفستگی

زیرنویس‌ها

C_P	ضریب فشار
-------	-----------

موجب مشکلاتی مانند نقض حفظ حریم شخصی شود که البته با در نظر گرفتن المان‌های معماری و جداسازی بخش خصوصی و عمومی می‌توان تأثیر این مشکل را به حداقل رساند. پیشنهاد می‌شود برای استفاده بهینه از تهویه طبیعی هماهنگ با نیازهای انسان امروز، در طراحی خانه‌های مدرن نیز از این اصول و الگوهای سنتی الهام گرفته شود. از سوی دیگر، مطالعات بیشتری در زمینه تعامل بین عناصر معماری و دیگر عوامل محیطی نظیر دما و رطوبت نیز می‌تواند به عرضه راهکارهای جامع‌تری برای بهینه‌سازی تهویه طبیعی کمک کند. درنهایت، پژوهش حاضر می‌تواند مرجعی علمی برای معماران، مهندسان، و محققان در زمینه بهینه‌سازی تهویه طبیعی و طراحی پایدار باشد. امید است که با استفاده از نتایج این پژوهش، شاهد طراحی و ساخت بناهایی باشیم که نه تنها با محیط زیست سازگار باشند، بلکه کیفیت مناسب تهویه در محل زندگی ساکنان را نیز به بهترین نحو ممکن فراهم کنند.

References

- Afshin, M. and A. Sohankar. "An Experimental Study on the Evaluation of Natural Ventilation Performance of a Two-Sided Wind-Catcher for Various Wind Angles". *Renewable Energy*, 85 (2015): 1068-1078.
- Alvarado, A., et al. "Modeling the Hygrothermal Behavior of Green Walls in COMSOL Multiphysics: Validation against Measurements in a Climate Chamber". *Building and Environment*, 2023, 238.
- Amidpoor, M., et al. "Investigating the Effects of Using Smokeless Heaters on Indoor Air Quality". In *Proceedings of Optimizing Fuel Consumption Conference*, Tehran: Khaje Nasir-e-din Toosi University Press, 2009. (In Persian)
- Aryal, P. and T. Leephakpreeda. "CFD Analysis on Thermal Comfort and Energy Consumption Effected by Partitions in Air-Conditioned Building". in *International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies*, 2015, 183-188.
- Asmi, A., et al. "Simulation of Room Airflow Using COMSOL Multiphysics Software". *Journal of Applied Mechanics and*

هو را در همه طول مسیر حفظ کرده و به دورترین نقاط پلان از بادگیر رسانده است. در پایان، جمع‌بندی نتیجه‌گیری انجام‌شده در «ت ۳۴» در قالب نموداری سه‌بعدی به تصویر کشیده شده است تا نتایج به‌دست‌آمده از هر ۴ الگوی انتقال جریان هوا با یکدیگر قابل مقایسه باشند. در ستون این نمودار سرعت جریان هوا (m/s) و در سطر آن مسافت طی‌شده هوا (m) مشخص شده است.

در آخر می‌توان به این نتیجه دست یافت که الگوی پیوسته بهینه‌ترین عملکرد را از بین ۴ الگو داراست و می‌تواند نقش بسزایی در تهویه طبیعی پایدار و مؤثر در خانه‌های سنتی بادگیردار داشته باشد. بنابراین بهترین شیوه جهت بهره‌وری حداکثری از تهویه طبیعی، استفاده از الگوی پیوسته در چینش پلان و فضاهاست تا جریان هوای ورودی از بادگیرها بیشترین بازده را داشته باشد؛ با این حال با وجود عملکرد بهینه‌ای که این الگو نسبت به دیگر الگوها دارد، استفاده از آن ممکن است

Materials, vols. 465-466 (2013): 571-577.

BahadoriNejad, M. and A.R. Dehghani. *Louver, Masterpiece of Iranian Engineering*. Tehran: Yazda Press, 2008. (In Persian)

BahadoriNejad, M., et al. *Wind Towers: Architecture, Climate and Sustainability*. Switzerland, London: Springer International Publishing, 2014.

Balocco, C. "Analysis of Ancient Natural Ventilation Systems Inside the Pitti Palace in Florence". Paper Presented at COMSOL Conference, Hannover, 2008.

Balocco, C. "Investigation on Natural Ventilation Techniques in Historical Buildings (A Case Study in Palermo)". Paper Presented at COMSOL Users Conference, Grenoble, 2007.

Building Research Energy Conservation Support Unit. *Energy Consumption Guide 19, Energy Efficiency in Offices*. London: Energy Conservation Support Unit (Gov), 1993.

Castillo, J. "Indoor Comfort Evaluation by Natural Ventilation in Hot Climates: Heat". Paper Presented at PLEA, Edinburgh, 2017.

- Dehghani, H., et al. "Numerical Analysis of the Performance of four-Sided Windtower Attached to Parlor and Courtyard in Different Wind Incident Angles". *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 16, no. 12 (2017): 125-134. (In Persian)
- Dehghani-Sanij, A. "Providing Thermal Comfort for Buildings' Inhabitants through Natural Cooling and Ventilation Systems: Wind Towers, Achieving Building Comfort by Natural Means". In *Innovative Renewable Energy*. Cham: Springer, 2022, 391-422.
- Fayaz, R. and A. Atrvash. "The Effect of Sash on Airflow in the Interior: Case Study of the Zinat al-Molk House, Shiraz". *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, vol. 6, no. 9 (2016): 19-26.
- Grote, L.V.D. *Research Methods in Architecture*. Transl. A.R. Eynifar. Tehran: Tehran University Press, 2013. (In Persian)
- Guoa, Weihong, et al. "Study on Natural Ventilation Design Optimization Based on CFD Simulation for Green Buildings". in *9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) Joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE)* 121, 2015.
- HajiGhasemi, K. *Treasury of Yazd Traditional Houses*. Tehran: Shahid Beheshti University Press, 2004. (In Persian)
- Houda, S., et al. "A CFD COMSOL Model for Simulating Complex Urban Flow". *Journal of Materials and Energy I & II*, 139 (2017): 373-378.
- International Conference on Materials and Energy (ICOME 2016), May 2016,
- Iran Meteorological Organization. "Meteorological Quarterly of Yazd Province: Archived Bulletin". no. 2 (Summer 2023): 3-14. (In Persian)
- Kasim, N. and A. Zaki. "CFD Study of Cross Ventilation Performance of Different Buildings Layouts". Paper Presented at the 2nd Asia conference of International Building Performance Simulation Association, Nagoya, Japan, 2014.
- Kazemi, M. and M. Akbarian. "Studying the Thermal Behavior of the Cellars of Traditional Houses in Yazd and Suggestions for Its Optimal Condition". Paper Presented at the First Architecture and Sustainable Urban Spaces Conference, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)
- Kazemi Esfeh, M., et al. "Experimental and Numerical Evaluation of Wind-Driven Natural Ventilation of a Curved Roof for Various Wind Angles". *Building and Environment*, 205 (2021): 108275.
- Koch-Nielsen, H. *Stay Cool: A Design Guide for the Built Environment in Hot Climates*. NewYork: Routledge, 2007.
- Kumar, R., et al. "Building Design on Wind-Driven Natural Ventilation with Different Simulation Air Models". in *Third International Conference on Futuristic Trends in Materials and Manufacturing*, vol. 46, no. 15, 2021, 6770-6774.
- La Rochelle, France. *Proceedings of the International Conference on Materials and Energy*. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- Lin, Z., et al. "Comparison of Performances of Displacement and Mixing Ventilations, Part II: Indoor Air Quality". *International Journal of Refrigeration*, 28 (2005): 288-305.
- Liu, H., et al. "Study on Ventilation of Indoor Substation Main Transformer Room Based on COMSOL Software". *1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 2017.
- Mahmoudi, M. and SM. Mofidi. "Investigating How the Architectural Plan of the Wind Deflectors Affects the Reduction of the Ambient Temperature". *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 13, no.2 (2011). (In Persian)
- Meroney, R. "CFD Prediction of Airflow in Buildings for Natural Ventilation". 11th Americas Conference on Wind Engineering, 2009.
- Montazeri, H. and F. Montazeri. "CFD Simulation of Cross Ventilation in Buildings Using Rooftop Wind-Catchers: Impact of Outlet Openings". *Renewable Energy*, 118 (2018): 502-520.
- Sadeghi, N., et al. "Numerical Investigation on Thermal Performance of a Wind-Catcher for Natural Ventilation in Hot and Dry Climate". *Journal of Renewable and New Energy*, vol. 8, no. 1 (2021): 23-40. (In Persian)
- Shaeri, J., et al. "A New Design to Create Natural Ventilation in Buildings: Wind Chimney". *Journal of Building Engineering*, vol. 59 (2022): 105041.
- U.S. Energy Information Administration. *U.S. Energy Data Report*, Washington DC: U.S. Department of Energy, 1995.
- U.S. Validation Services Inc. "Airflow Visualization Test". 2024. https://usvalidation.com/kb/eq_bsc_lfh_smoke_test.aspx
- Zaki, A. and R.N. Sharma. "A CFD Simulation Study of Natural Ventilation with a Two-Sided Wind Catcher System". 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Auckland, NewZeland, 2017.