

Numerical investigation of indoor airflow behavior in Bushehr's Sa'adat School based on the Openings and corridors situation using CFD method

Omid Rahaei, PhD. * 

Assistant Professor, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Milad Omid

PhD Candidate, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

Somayeh Dehdashti

M Arch, Faculty of Art and Architecture, Azad University Ahwaz Branch, Ahwaz, Iran

Rahaei, O., Omid, M. and Dehdashti, S., 2024. Numerical investigation of indoor airflow behavior in Bushehr's Sa'adat School based on the Openings and corridors situation using CFD method. *Soffeh* 34 (3): 39-54.

DOI: [10.48308/sofeh.2024.104797](https://doi.org/10.48308/sofeh.2024.104797)

Received: October 31, 2023

Accepted: November 9, 2023

(Pages: 39-54)

Keywords:

Natural ventilation,
Opening, Sa'adat school
Bushehr, CFD method

Abstract:

Background and objectives: Indoor air quality is one of the important factors related to the health and wellbeing of users, with passive technologies such as natural ventilation being crucial to improve air quality. Natural ventilation and air flow behaviour in different climates are, therefore, important to investigate, particularly in hot and humid areas where the need for the air flow is at its highest. Climatic demands are a key factor in spatial formations of traditional cities of Iran, with the hot, humid city of Bushehr being a prime example. The present article deals with

SOFFEH

Soffeh Journal, Shahid Beheshti University, Vol. 34, Issue 3, No. 106, 2024  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: o.rahaei@sru.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/sofeh.2024.104797>



mathematical investigations of the behaviour of the internal air flow prompted by external winds. Focusing on the openings in the traditional building of Bushehr's Sa'adat school, it tries to highlight the role of the openings and semi-open corridors in responding the need to generate and direct the constant flow of air in the interior spaces.

Methods: A hybrid method is used in the present research. In the first stage, by formulating an experimental strategy, the physical elements of the school (independent variables) were examined, and with the help of precise digital devices, the speed and direction of the air flow inside (dependent variable) was registered in a test period. Analyses were then done using CFD simulation strategy and using Gambit preprocessor and Fluent software (after proving the validity and reliability).

Results and conclusion: The results show that the dominant west and north-west winds, break when they hit the west wall of the school and change direction to the sides and upwards. This collision is associated with an increase in pressure behind and above the wall, as well as an increase in speed behind the wall compared to the prevailing air flow speed. The lowest air speed and pressure is at the level close to the courtyard, and with the increase in height to the middle of the window comes an increase in the air flow. The location of the spaces, corridors, porticoes, and openings significantly affect the pattern of internal flows, and the special composition and physical characteristics of the side corridors cause the existing air inside the classrooms to be sucked outside prompting natural ventilation. Also, the flow in classrooms flanked by side corridors with suitable openings was measured at least 0.05 m/s on average.

بررسی عددی رفتار جریان هوای داخل مدرسه سعادت بوشهر بر اساس موقعیت بازشوها و راهروها با دینامیک سیال محاسباتی^۱

امید رهایی^۲

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

میلا امید^۳

سمیه دهدشتی^۴

دریافت: ۹ آبان ۱۴۰۲
پذیرش: ۱۸ آبان ۱۴۰۲
(صفحه ۳۹-۵۴)

رهایی، ا. م. امید، و س. دهدشتی. ۱۴۰۳. بررسی عددی رفتار جریان هوای داخل مدرسه سعادت بوشهر بر اساس موقعیت بازشوها و راهروها با دینامیک سیال محاسباتی. فصلنامه علمی معماری و شهرسازی صفحه. ۳۴ (۳): ۳۸-۲۳.

کلیدواژگان: تهویه طبیعی، بازشو، مدرسه سعادت بوشهر، دینامیک سیال محاسباتی.

چکیده

پیشینه‌ها و اهداف: مطالعات حاکی از آن هستند که در دو دهه گذشته توجه به جریان هوای داخل در قالب دانشی نوین به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در تحقیقات انجام‌شده، محققان به بررسی معماری و وضعیت تهویه طبیعی در فضاهای آموزشی، فضاهای مسکونی، و فضاهای اداری، ساختمان‌های چندطبقه، هندسه بالکن، و بادگیر پرداخته‌اند. محدودیت‌های اقلیمی در شهرهای سنتی ایران یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد شیوه‌های خاص معماری و به‌ویژه در امر تهویه و رفتار جریان هوا بوده و در این میان شهرستان بوشهر با اقلیم گرم و مرطوب، به منظور تسهیل فرایند تهویه طبیعی در ساختمان، سبک معماری به‌خصوصی یافته است. موضوع مقاله حاضر بررسی عددی رفتار جریان هوای داخل تحت تأثیر باد خارج با تکیه بر وضعیت بازشوها در مدرسه سنتی سعادت بوشهر است و به تحلیل نقش بازشوها و فضاهای نیمه‌باز راهرویی، با توجه به لزوم برقراری و هدایت جریان دائمی هوا در فضاهای داخلی این مکان آموزشی، پرداخته می‌شود. مواد و روش‌ها: با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای این پژوهش، از روشی ترکیبی در تحقق آن استفاده شد: در مرحله اول با تدوین راهبردی تجربی، عناصر کلیدی معماری مدرسه سعادت (متغیرهای مستقل)

بررسی شدند و با کمک دستگاه‌های دقیق دیجیتال، سرعت و جهت جریان هوای داخل (متغیر وابسته) در یک دوره آزمون به ثبت رسید. سپس تحلیل‌ها با استفاده از راهبرد شبیه‌سازی با روش CFD و با بهره‌گیری از پیش‌پردازشگر Gambit و نرم‌افزار Fluent (پس از اثبات روایی و پایایی) صورت پذیرفت. نتیجه‌ها و جمع‌بندی: نتایج نشان می‌دهند که موقعیت فضاهای پروخالی، راهروها، و رواق‌ها و وضعیت بازشوها در شکل‌گیری الگوی جریان‌های داخلی بسیار مؤثر است و ویژگی‌های کلیدی راهروهای جانبی باعث مکش هوای مسن درون کلاس‌ها به سمت خارج می‌شود و نقش کلیدی در تخلیه هوای داخلی و برقراری فرایند مؤثر تهویه طبیعی دارد. همچنین جریان هوا در کلاس‌هایی که با راهروهای جانبی محصور هستند و بازشوهای مناسبی دارند، به‌طور متوسط حداقل ۰/۰۵ متر بر ثانیه است.

مقدمه

کیفیت هوای داخل ساختمان یکی از عوامل مهم مرتبط با سلامت کاربران است. فناوری‌های غیرفعال چون تهویه طبیعی به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند.^۵ تهویه طبیعی متداول‌ترین فناوری انرژی

۱. این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده سوم است با عنوان «طراحی پژوهش‌کننده انرژی‌های نو در بوشهر با رویکرد ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در فضاهای آموزشی» که در رشته معماری، به راهنمایی نویسنده نخست در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز در ۲۱ شهریور ۱۳۹۴ دفاع شده است.

۲. نویسنده مسئول

o.rahaei@sru.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

m.omidi@sru.ac.ir

۴. کارشناس ارشد معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

somayah.dehdashti@gmail.com



فصلنامه علمی معماری و شهرسازی؛ سال سی و چهارم، پاییز ۱۴۰۳، شماره ۳، پیاپی: ۱۰۶

*. 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: o.rahaei@sru.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.48308/sofeh.2024.104797>

پرسش پژوهش

– رفتار جریان هوا در مدرسهٔ سعادت تحت تأثیر بازشوها و شکل راهروها چگونه است؟

5. H. Yin, et al., "Measurement and Evaluation of Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Residential Buildings", *Indoor Built Environment Journal*, no. 13 (2019): 1-17.

6. P. Miri and P. Babakhani, "On the Failure of the Only Vernacular Windcatcher in the Mountainous Region of Western Iran: Opportunities for Energy-efficient Buildings", *Journal of Cleaner Production*, 295 (2021): 126383; Y. Chen, et al., "Transfer Learning with Deep Neural Networks for Model Predictive Control of HVAC and Natural Ventilation in Smart Buildings", *Journal of Cleaner Production*, 254 (2020): 119866.

۷. امید رهایی و حمیدرضا عظمتی، «ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در کلاس‌های مدارس استان مازندران بر اساس وضعیت بازشوها با روش CFD»، معماری و شهرسازی ایران، ش. ۱۹ (بهار و تابستان ۱۳۹۹): ۵۷-۷۱.

8. Y. Wu, et al., "Numerical Study on Natural Ventilation of the Wind Tower: Effects of Combining with Different Window Configurations in a Low-rise House", *Building and Environment*, 188 (2021): 107450; X. Meng, et al., Experimental Study on the Performance of Hybrid Buoyancy-driven Natural

غیرفعال با هزینه کم نگهداری^۶ است که در سال‌های طولانی با استفاده از نیروی باد برای ایجاد شرایط زیستی مناسب بوده است و می‌تواند جانشین مناسبی برای تهویهٔ مطبوع به‌منظور کاهش مصرف انرژی باشد.^۷ بنابراین تهویهٔ طبیعی و رفتار جریان هوا در اقلیم‌های مختلف قابل بررسی و مهم است.^۸ همچنین این موضوع در مناطق گرم و مرطوب، که بیشترین نیاز را به وزش مناسب باد برای ارتقای کیفیت هوای داخل دارند، از اهمیت بالاتری برخوردار است. این در حالی است که بررسی شیوه‌های تهویهٔ طبیعی موجود در معماری سنتی و بومی ایران می‌تواند به معماری امروز کمک کند.^۹ کاربری‌های متنوع مسکونی، تجاری، و آموزشی از معماری گذشته باقی مانده که باید روش‌های ایجاد جریان هوا و تهویهٔ طبیعی در فضای داخلی آنها مطالعه شود تا بتوان با جمع‌بندی پژوهش‌های مختلف از یک اقلیم، بهترین روش‌های جریان هوا را مشخص کرد. تهویهٔ طبیعی بر اثر ایجاد جریان هوا بین فضای داخل و خارج صورت می‌گیرد و چون بازشوها از مهم‌ترین عناصر ساختمانی و یکی از راه‌های ارتباطی فضای داخل و خارج هستند، بررسی آنها در میزان عبور و رفتار جریان هوا لازم است.

بوشهر، به لحاظ اقلیمی، آب‌وهوایی گرم و مرطوب دارد که نیازمند تهویهٔ مناسب برای جلوگیری از تمرکز رطوبت و رکود هواست. در این میان، تحلیل تهویهٔ طبیعی در کاربری‌های آموزشی که نیاز به کیفیت و جریان هوای مطلوب برای حضور دانش‌آموزان دارند نیز ضروری است. به این منظور در پژوهش حاضر، مدرسهٔ سعادت بوشهر بررسی می‌شود. در این پژوهش نگارندگان با هدف تحلیل الگوی جریان هوای داخلی تحت تأثیر باد خارج، به بررسی عددی رفتار تهویهٔ طبیعی در این مدرسه پرداخته‌اند.

۱. پیشینه تحقیق

مطالعات نشانگر آن هستند که در دو دههٔ گذشته توجه به جریان هوای داخل در قالب دانشی نوین به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.^{۱۰} در تحقیقات انجام‌شده، پژوهشگران به بررسی وضعیت تهویهٔ طبیعی در فضاهای آموزشی^{۱۱}، فضاهای مسکونی^{۱۲}، فضاهای اداری^{۱۳}، ساختمان‌های چندطبقه^{۱۴}، و هندسهٔ بالکن و بادگیر^{۱۵} پرداخته‌اند. شولز و همکاران به بررسی تهویهٔ طبیعی کنترل‌شده

Ventilation with a Mechanical Exhaust System in an Industrial Building", *Energy and Buildings*, 208 (2020): 109674; W. Lyu, et al., "A General Method to Evaluate the Applicability of Natural Energy for Building Cooling and Heating: Revised Degree Hours", *Energy and Buildings*, 250 (2021): 111277.

۹. امید رهایی، «هویت فرهنگی و اثرات آن بر روش‌های بومی تهویه طبیعی بازار قدیم دزفول، راسته صنعتگران»، *باغ نظر*، ش. ۲۴ (بهار ۱۳۹۲): ۴۶-۳۹.

۱۰. مجید عمیدپور، «بررسی اثرات استفاده از بخاری‌های بدون دودکش بر روی کیفیت هوای داخل»، در شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت ایران، ۱۳۸۸.

11. C.C. Vassella, et al., "From Spontaneous to Strategic Natural Window Ventilation: Improving Indoor Air Quality in Swiss Schools", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 234 (2021): 113746.; A.J. Aguilar, et al., "Assessment of Ventilation Rates inside Educational Buildings in Southwestern Europe: Analysis of Implemented Strategic Measures", *Journal of Building Engineering*. 51(12) (2022): 104204;

رهايي و عظمتي، «ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در کلاس‌های مدارس استان

بررسی کرده‌اند و پس از اعتباربخشی محاسبات با نتایج اولسن، مشخص شد نتیجه هر دو پژوهش مشابه است.^{۳۳} همچنین رهایی در مقاله‌ای در خصوص تحلیل مدل‌های جریان هوای داخلی در سوله‌های صنعتی به این نتیجه رسید که متغیرهای مستقل معماری و موقعیت بازشوها و دمنده‌ها بر جریان هوای داخلی اثر می‌گذارد و تغییرات این متغیرها جریان هوا را اصلاح می‌کند.^{۳۴} همچنین در مقاله دیگری در بررسی روش‌های بومی تهویه طبیعی در بازار قدیم دزفول این نتیجه حاصل شد که جریان هوای داخلی بازار تحت تأثیر هویت معماری است و در تمام فضای داخلی بازار، جریان هوا سبب خروج مؤثر هوای آلوده می‌شود.^{۳۵} سربیانوریکا و همکاران با آزمایش تجربی و شبیه‌سازی، مطالعه‌ای بر میزان کربن‌دی‌اکسید در ساختمان‌های آموزشی، اداری، و بیمارستانی با توجه به اندازه و موقعیت پنجره‌ها انجام داده و مشخص کرده‌اند که اندازه، تعداد، و موقعیت پنجره‌ها تأثیر عمده‌ای بر کیفیت هوای داخل ساختمان دارد.^{۳۶} تودوسیو و همکاران، کامپچر و همکاران، و اسفور و همکاران با روش‌های مشابه شبیه‌سازی و استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی شیوه‌های تهویه طبیعی پرداختند.^{۳۷} همچنین در تحقیق‌های دیگری عواملی چون پنجره‌ها و شرایط وابسته به آن مانند فرم‌ها و مدت زمان باز شدن پنجره^{۳۸}، رفتار ساکنین در حالت‌های مختلف استفاده از پنجره^{۳۹}، و ابعاد بازشو^{۴۰} از عوامل مؤثر بر تهویه طبیعی بیان شده‌اند. شاعری و همکاران با استفاده از حسگرها، متغیرهای محیطی شامل دما، رطوبت نسبی، و سرعت جریان باد را در دو بنای مسکونی در اقلیم گرم و مرطوب بوشهر بررسی و مشخص کرده‌اند که شرایط حرارتی داخلی مطلوب و ناشی از روش‌های سرمایش خورشیدی و تهویه طبیعی است.^{۳۱} رنجبر و همکاران به بررسی جریان باد در مسیر طراحی معماری و شهری، به‌منزله یکی از عوامل اقلیمی، پرداختند و نتایج تحقیق

در ساختمان‌های اداری و میزان تأثیر آن بر سرمایش غیرفعال پرداخته و نتیجه گرفته‌اند تهویه طبیعی در ساختمان‌های پیشرفته نیز، با طراحی مناسب، عملکرد مناسبی خواهند داشت.^{۱۶} آگوئیلر و همکاران کیفیت خوب هوای داخلی در فضاهای عمومی را به‌علت همه‌گیری کرونا و نیاز به تهویه طبیعی ضروری دانستند و استراتژی‌های تهویه طبیعی را رهبرد غالب در بناهای آموزشی اروپا معرفی و بررسی و تهویه طبیعی مناسب را عامل کاهش خطرات عفونت قلمداد کرده‌اند.^{۱۷} هان و همکاران نیز یک مدل کمی آسایش حرارتی را با بهره‌گیری از روش‌های آماری و شبکه مصنوعی عصبی برای محیط‌های مسکونی روستایی و شهری دارای تهویه طبیعی ابداع کردند، نتایج تحقیق آنها نشان داد که احتمالاً سازگاری فیزیولوژیکی و تحمل سرمای ساکنان روستایی نسبت به ساکنان شهری بیشتر است و یا به‌دلیل استفاده کمتر از تهویه مطبوع در مناطق روستایی، انتظار حرارتی کمتری نسبت به شهر هست.^{۱۸} رحیمی‌نژاد و همکاران به بررسی تهویه طبیعی در دیوارهای سبک و سنگین با مقایسه در نماهای فعال و غیرفعال پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که نماهای فعال می‌تواند عملکرد ساختمان و تهویه طبیعی را بهبود بخشد.^{۱۹} گوف و همکاران در بررسی تهویه‌های طبیعی یک‌طرفه، مدلی را برای تهویه مناسب در جریان‌های آشفته عرضه کرده‌اند و نتیجه این است که اگرچه بازشوها کوچک پنجره‌ای با جریان‌های بسیار متلاطم برای ساختمان‌های سرپوشیده در نواحی شهری رایج است، مدل توسعه‌یافته آینده باید شامل پیکربندی‌های مختلفی برای ارزیابی کلیت این نتایج باشد.^{۲۰} اولسن^{۲۱} پس از مطالعاتی^{۲۲}، جریان طبیعی هوا را در ابعاد واقعی به نسبت ۱ به ۳ در یک اتاقک با عدد رایلی حدود ۱۰۱۰ بررسی کرد که از نتایج این آزمایش برای اعتبارسنجی تحقیقات بعدی استفاده شده است. پس از آن ناگانو و تاگاوا جریان هوا را با مدل صفر معادله‌ای و $k - \epsilon$ شبیه‌سازی و

→ مازندران بر اساس وضعیت بازشوها با روش CFD»، ۷۱-۵۷.

12. Yin, et al., "Measurement and Evaluation of Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Residential Buildings", 1-17; J. Han, et al., "A Comparative Analysis of Urban and Rural Residential Thermal Comfort under Natural Ventilation Environment", *Energy and Buildings*, 41 (2009): 139-145; A. Figueroa-Lopez, et al., "Evaluation of Passive Strategies, Natural Ventilation and Shading Systems, to Reduce Overheating Risk in a Passive House Tower in the North of Spain during the Warm Season", *Journal of Building Engineering*, 43 (2021): 102607;

امید رهایی، «بررسی تغییرات کالبدی حیاط‌های مرکزی بر الگوی جریان هوای داخل آن‌ها در خانه‌های دوران قاجار اصفهان با روش CFD؛ مورد پژوهی: خانه لیا»، معماری و شهرسازی پایدار، دوره ۹، ش. ۲ (آبان ۱۴۰۰): ۲۵-۴۶.

13. T. Schulze, et al., "Performance Assessment of Controlled Natural Ventilation for Air Quality Control and Passive Cooling in Existing and New Office Type Buildings", *Energy and Buildings*, 172 (2018): 265-278;

آنها نشان داد فضاهای شهری بوشهر در سلسله‌مراتبی از طراحی اقلیمی متناسب با جریان باد در ویژگی‌هایی همچون مکان‌یابی و تنظیم طبقات ارتفاعی بافت، شکل معابر شهری، و شکل فضاهای معماری تبلور می‌یابد.^{۳۳} بحرانی و همکاران نیز عنصر معماری شناشیر را با هدف تبیین علت وجودی و تحلیل آن و با روش دینامیک سیال محاسباتی و نرم‌افزار فلوئنت بررسی کرده و این نتیجه را به دست آورده‌اند که سرعت و تغییر جهت حرکت باد تحت تأثیر شناشیرها قابل توجه است و شرایط اقلیمی مطلوبی را در فصل گرما ایجاد می‌کند.^{۳۳} با عنایت به مطالعات یادشده، تهویه طبیعی از مناسب‌ترین روش‌های ایجاد کیفیت هوای خوب غیرفعال است.^{۳۴} از آنجاکه بررسی تهویه طبیعی نمونه‌های متنوع از معماری سنتی هر اقلیم، به عرضه یک الگوی جامع از رفتار جریان هوا برای استفاده در معماری امروز کمک می‌کند، ضرورت پژوهش حاضر تأیید و عرضه الگوی جریان هوا در مدرسه سعادت بوشهر (که قبلاً انجام نشده است) نیز نوآوری آن را می‌نمایاند.

۲. روش‌شناسی تحقیق

پژوهش حاضر ماهیتی میان‌رشته‌ای دارد و از نوع تحقیقات کاربردی و کمی است. همچنین به دنبال یک راهبرد تجربی صورت گرفته و با استفاده از شبیه‌سازی، در آن چگونگی تهویه طبیعی در کاربری آموزشی در مدرسه سعادت بوشهر (نمونه موردی) بررسی می‌شود. در این مقاله فرض بر این است که تهویه طبیعی کلاس‌ها در فضاهای آموزشی قدیم بوشهر با توجه به شرایط اقلیمی و معماری بومی و بر طبق اصول معماری در اقلیم گرم و مرطوب شکل گرفته و روش خلاقانه آن به معماری بومی شهر اصالت ویژه‌ای بخشیده است. بنابراین روش تحقیق ترکیبی است. در مرحله اول با استفاده از یک راهبرد تجربی متغیرها این‌گونه مشخص شده‌اند:

بازشوها معرف معماری اقلیمی بوشهر متغیرهای اصلی، محل قرارگیری و فرم و جهت آنها متغیرهای مستقل، و سرعت و دما و رطوبت و جهت جریانات هوایی متغیرهای وابسته.

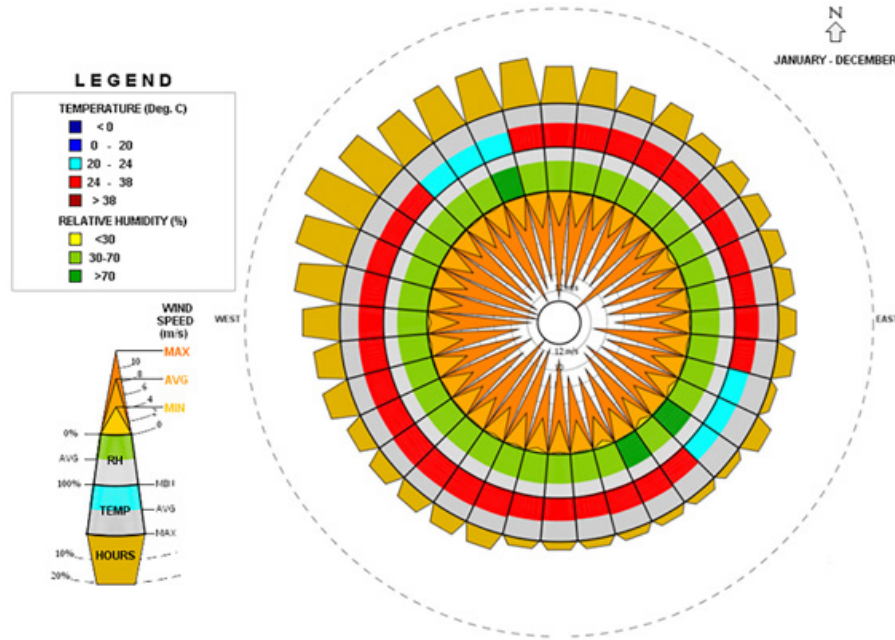
متغیرهای وابسته توسط دستگاه‌های دقیق دیجیتال (سرعت‌سنج، بادسنج، دماسنج، و رطوبت‌سنج) در طول مدت آزمون اندازه‌گیری شدند.

در مرحله دوم با شبیه‌سازی به روش دینامیک سیال محاسباتی^{۳۵}، حجم سه‌بعدی ساختمان توسط برنامه گمیت شبکه‌بندی و نیز برنامه فلوئنت، ضمن بررسی شرایط مرزی، شبیه‌سازی شد. مطابق مطالعات بررسی‌شده، شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی اعتبارسنجی شد و سپس داده‌ها با روشی تحلیلی بررسی شدند. همچنین با توجه به پیشینه تحقیق، از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است.

۳. معرفی مدرسه سعادت بوشهر

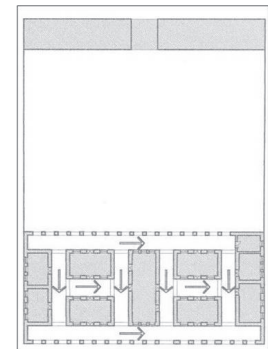
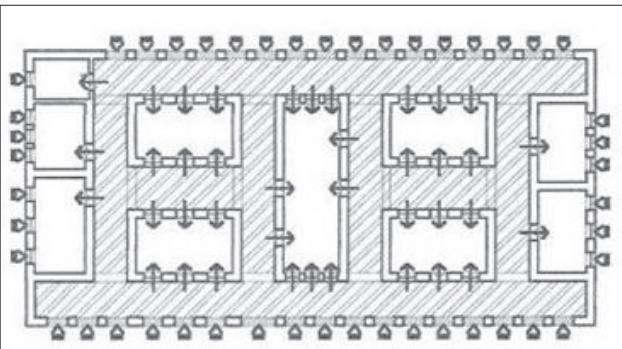
در طول دوره آزمون این پژوهش، ساختمان قدیم مدرسه سعادت مربوط به سال ۱۲۷۸ش در شهر بوشهر بررسی شد که تهویه کلاس‌های آن با بازشوهای متعددی صورت می‌گیرد. مدرسه سعادت جدید نیز در جبهه جنوب غربی ساختمان قدیم در سه طبقه ساخته شده است. بندر بوشهر در جنوب ایران و در حاشیه شمالی خلیج فارس واقع است. از نظر اقلیم، بوشهر در نگاه کلان حاره‌ای، در نگاه منطقه‌ای نیمه‌حاره‌ای و نیمه‌خشک^{۳۶}، و در اقلیم محلی دارای تفاوت زیاد درجه حرارت تابستان (در مرداد و شهریور برابر ۳۶ درجه سانتیگراد) و زمستان (در دی و بهمن ۱۰ درجه سانتیگراد) است. باد محلی نیز نشان می‌دهد که در همه ماه‌ها، از ساعت ۱۲:۳۰ تا ۱۸:۳۰ و در صبح‌های خرداد و تیر، جریان هوا به صورت نسیم متوسط و زنده از شمال غرب و در شب‌ها در همه ماه‌های

این مدرسه همانند ساختار بافت قدیمی از سنگ آهک مرجانی به همراه ملات گچ بوده است.



ت ۱ (بالا). باد غالب و متوسط سرعت جریان هوا، مأخذ: Climate Consultant.6, 2022, available in: <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>

ت ۲ (پایین، راست). سازماندهی ۳ (پایین، میان). جبهه شرقی و ت ۴ (پایین، چپ). تهویه و نور خطی مدرسه، مأخذ: سازمان ورودی مدرسه، مأخذ: آرشیو میراث فرهنگی بوشهر. نوسازی مدارس.



تابستان به صورت نسیم ملایم و نسیم متوسط و زنده از سمت شمال و شمال غربی می‌وزد. در «ت ۱» جهت باد غالب از شمال و شمال غرب فرض شده است. عمدتاً ساختمان‌ها در بوشهر کشیدگی شرقی غربی دارند، اما وضعیت چندگانه باد سبب شکل‌گیری بلوک‌ها در جهات مختلف شده است.^{۳۷}

ارتفاع سقف کلاس‌ها در مدرسه سعادت حدود ۴/۵ متر و بر اساس مشاهدات، دمای داخلی کلاس‌ها پایین‌تر از فضای خارج کلاس‌هاست. مطابق «ت ۲» سازماندهی فضایی این مدرسه به صورت ترکیبی است؛ یعنی در مقیاس کل، سازماندهی مرکزی است و در دو ساختمان در دو جبهه فضای باز مرکزی قرار گرفته‌اند و در مقیاس جزء، سازماندهی خطی و هرکدام از این دو ساختمان به صورت جداگانه قابل تعریف است. ساختمان اصلی مدرسه قدیم، در جبهه غربی زمین و به اندازه دو پله بالاتر از سطح حیاط و حیاط اصلی مدرسه نیز در جلوی آن در جبهه شرقی واقع شده است. ورودی اصلی مدرسه از جبهه شرقی است (ت ۳). راهروهای دسترسی به کلاس‌ها (ت ۲ و ۵) به صورت شبکه‌ای در چهار جبهه کلاس‌ها قرار دارد. عرض راهروهای شرقی و غربی ۲/۷ و عرض راهروهای شمالی و جنوبی ۳/۶ متر است. در فضای داخلی کلاس‌ها، بازشوهای بزرگ مقابل هم باعث جریان هوا در داخل فضا می‌شود. در نمای مدرسه از قوس استفاده شده و ساختار کلی

۴. آزمون‌های تجربی در مدرسه سعادت

چهار کلاس به صورت تصادفی و به طور دقیق در یک دوره زمانی یک ساله از فروردین تا اسفند سال ۱۳۹۹ تحلیل و ارزیابی شد. آزمون‌های تجربی سرعت باد و دماسنجی در فضاهای مشخص شده در «ت ۷» به صورت دوره‌ای هر سه هفته یک بار بین ساعات ۱۰ تا ۱۲ در طول مدت یک ساله آزمون انجام شد. برای اندازه‌گیری دقیق سرعت باد از دو دستگاه سرعت‌سنج لوترن^{۳۸} که با حسگر سیم‌حرارتی خود قابلیت اتصال به رایانه را دارد، یکی در خارج بنا (حیاط) و یکی در داخل بنا به طور هم‌زمان استفاده شد (ت ۶). این آزمون‌ها در مدرسه و نیز در بیش از ۱۵ نقطه مختلف در فضاهای داخلی کلاس‌های موردی در ترازهای متفاوت ارتفاعی صورت پذیرفت. آزمون‌های تجربی در

کلاس‌های درس از دو جبهه بازشو دارند، ولی نورگیری اصلی آنها از یک جبهه صورت می‌گیرد و از بازشوهایی که به سمت حیاط مرکزی باز می‌شوند، تنها برای تهویه فضا استفاده می‌شود و نورگیری چندانی از آنها صورت نمی‌گیرد (ت ۴).



ت ۵ (بالا، چپ). دسترسی به فضاهای مدرسه، ایوان غربی، عکس: سازمان نوسازی مدارس. ت ۶ (بالا، راست). دستگاه سرعت‌سنج باد لوترن.

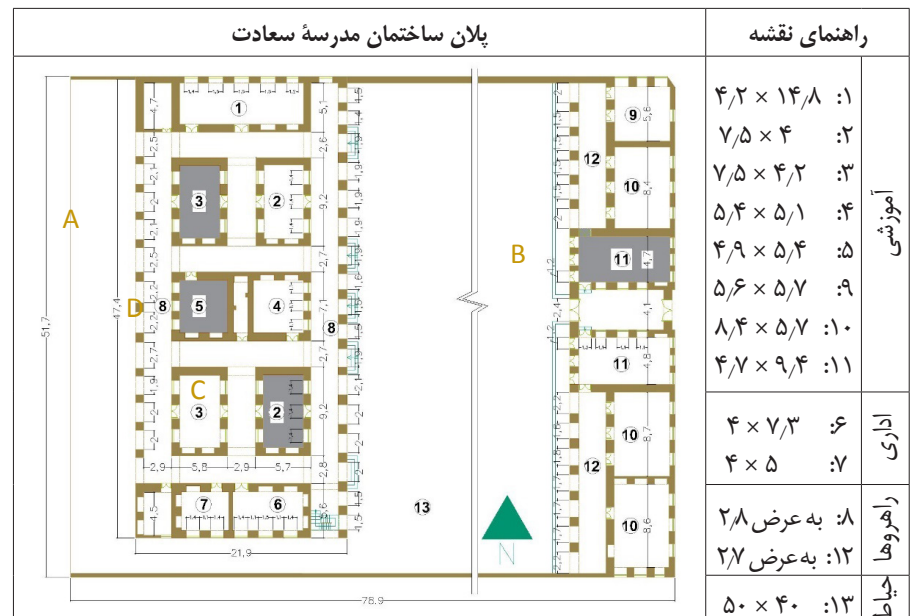


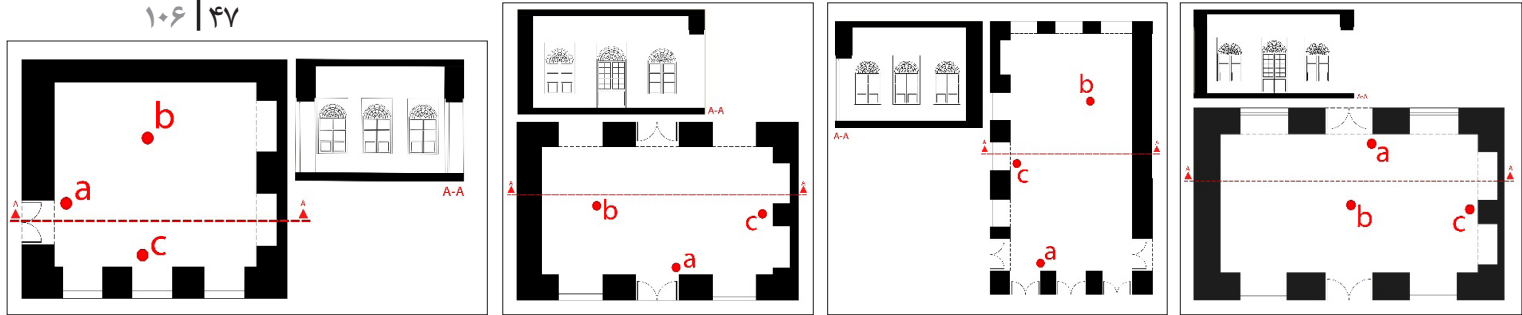
زمان آزمون	دمای متوسط فضای بیرون ساختمان	دمای متوسط در کلاس ۱	دمای متوسط در کلاس ۲	دمای متوسط در کلاس ۳	دمای متوسط در کلاس ۴
فروردین ۱۳۹۹	۲۳٫۸	۲۲٫۹	۲۳	۲۲٫۵	۲۸٫۵
اردیبهشت ۱۳۹۹	۲۹٫۳	۲۹٫۵	۲۹٫۱	۲۸	۳۳
خرداد ۱۳۹۹	۳۲٫۲	۳۲	۳۲٫۸	۳۱٫۳	۳۵٫۶
تیر ۱۳۹۹	۳۳٫۹	۳۵	۳۵	۳۴٫۸	۳۶
مرداد ۱۳۹۹	۴۰٫۲	۳۸	۳۷	۳۶٫۲	۳۹٫۵
شهریور ۱۳۹۹	۴۲٫۸	۴۲	۴۱٫۵	۴۱	۴۲
مهر ۱۳۹۹	۳۱	۳۰٫۷	۳۰٫۲	۲۹	۳۲٫۱
آبان ۱۳۹۹	۲۵٫۳	۲۵٫۷	۲۴٫۶	۲۵٫۱	۲۶٫۶
آذر ۱۳۹۹	۲۰٫۹	۲۰٫۴	۲۰	۲۰٫۶	۲۱٫۳
دی ۱۳۹۹	۱۸٫۷	۲۰	۱۹	۱۹٫۴	۲۱٫۱
بهمن ۱۳۹۹	۱۹٫۶	۲۱٫۷	۱۸٫۷	۱۹	۲۱٫۹
اسفند ۱۳۹۹	۱۹٫۹	۲۱	۱۹	۲۰	۲۲

جدول ۱ (چپ).

مقایسه درجه حرارت متوسط در کلاس‌های انتخابی ۱ تا ۴.

ت ۷ (پایین، راست). پلان مدرسه و اندازه و موقعیت فضاها، پژوهش: نگارندگان، بر اساس آرشیو مدارک میراث فرهنگی استان بوشهر.





- ۸ تا ۱۱ (بالا). به ترتیب از راست به چپ:
- پلان و مقطع کلاس انتخابی A.
 - پلان و مقطع کلاس انتخابی B.
 - پلان و مقطع کلاس انتخابی C.
 - پلان و مقطع کلاس انتخابی D.

جدول ۲ (پایین). جدول مقایسه‌ای سرعت متوسط هوا در کلاس‌های انتخابی ۱ تا ۴.

و خارج اندک است و در برخی موارد دمای هوای فضای داخلی کمتر است. همچنین بنابر «جدول ۲»، سرعت متوسط هوا در نزدیک سطح زمین در برخی ماه‌ها به صفر می‌رسد و با افزایش ارتفاع از زمین، این سرعت افزایش می‌یابد اما عمدتاً از سرعت هوای فضای بیرون کمتر یا برابر با آن است. برای اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌ها نیز، مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمون تجربی در «ت ۱۲» آمده است. این تصویر نشان‌دهندهٔ اختلاف میانگین سرعت باد در

۳ تراز ارتفاعی از سطح حیاط، ۰٫۶۰ متر (به‌منظور اعتباربخشی به شبیه‌سازی)، ۱٫۶۰ متر (حدود تراز ارتفاعی بالاتنه و سر و گردن)، و ۲٫۴۰ متر (حداکثر ارتفاع مورد نیاز آسایش حرارتی) و در نقاط مختلف فضای کلاس‌ها (ت ۸ تا ۱۱) انجام شده است. در نمونه‌های موردی دمای محیط (جدول ۱) و سرعت وزش باد در نقاط آزمون (جدول ۲) در فضاهای داخلی و خارجی اندازه‌گیری شد. مطابق «جدول ۱» تفاوت بین دمای هوای فضای داخلی

M. Indraganti, et al., "Adaptive Model of Thermal Comfort for Offices in Hot and Humid Climates of India", *Building and Environment Journal*, 74 (2017): 39-53; M. Indraganti and D. Boussaa, "Comfort Temperature and Occupant Adaptive Behavior in Offices in Qatar during Summer", *Energy and Building*, 150 (2017): 23-36; M. Nomura and K. Hiyama, "A Review: Natural Ventilation Performance of Office Buildings in Japan", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (2017): 746-754.

زمان آزمون	سرعت متوسط باد در ارتفاع ۲ متری فضای بیرون ساختمان				سرعت متوسط هوا در ارتفاع ۶۰ سانتیمتری در کلاس‌های				سرعت متوسط هوا در ارتفاع ۱۰۶ متری در کلاس‌های				سرعت متوسط هوا در ارتفاع ۲۰۴ متری در کلاس‌های			
	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱	۴	۳	۲	۱
فروردین ۱۳۹۹	۰٫۶	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳
اردیبهشت ۱۳۹۹	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳
خرداد ۱۳۹۹	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰
تیر ۱۳۹۹	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰
مرداد ۱۳۹۹	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
شهریور ۱۳۹۹	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۰	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
مهر ۱۳۹۹	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲
آبان ۱۳۹۹	۰٫۵	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳	۰٫۳
آذر ۱۳۹۹	۰٫۷	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۳	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴	۰٫۴
دی ۱۳۹۹	۱٫۲۱	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۸	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷	۰٫۷
بهمن ۱۳۹۹	۰٫۹	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۸	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۶
اسفند ۱۳۹۹	۰٫۸	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۶	۰٫۵	۰٫۷	۰٫۴	۰٫۶	۰٫۴	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵

14. S. Omrani, et al., "Natural Ventilation in Multi-storey Buildings: Design Process and Review of Evaluation Tools", *Building and Environment*, 116 (2017): 182-194.
15. N. Izadyar, et al., "A Numerical Investigation of Balcony Geometry Impact on Single-sided Natural Ventilation and Thermal Comfort", *Building and Environment Journal*, vol. 177 (2020): 106847; F. Jomehzadeh, et al., "Natural Ventilation by Windcatcher (Badgir): A Review on the Impacts of Geometry, Microclimate and Macroclimate", *Energy and Buildings*, 226 (2020): 110396; Jomehzadeh, et al., "A Review on Windcatcher for Passive Cooling and Natural Ventilation in Buildings, Part 1: Indoor Air Quality and Thermal Comfort Assessment", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 (2017): 736-756.
16. Schulze, et al., Performance Assessment of Controlled Natural Ventilation

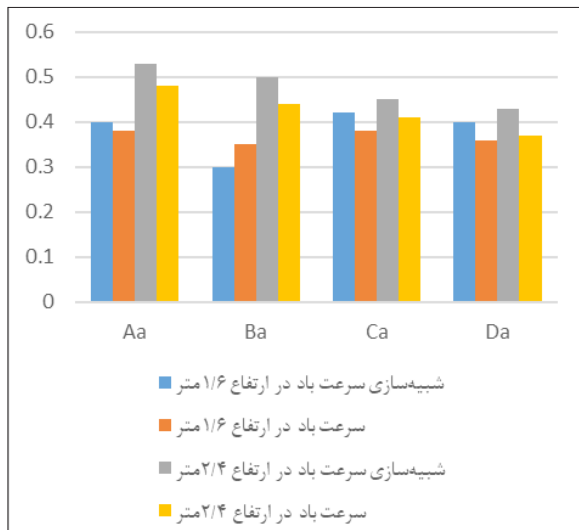
ت ۱۲. مقایسه سرعت متوسط جریان هوا در ارتفاعات مورد مطالعه در دهانه کلاس‌ها، پژوهش: نگارندگان.

دهانه کلاس‌های مورد مطالعه در آزمون تجربی و داده‌های شبیه‌سازی است که این اختلاف، در مجموع، زیر ۱۰٪ و در محدوده استاندارد اشری است.

۵. شبیه‌سازی

بر اساس مطالعات بررسی‌شده، از روش دینامیک سیال محاسباتی برای شبیه‌سازی جریان هوای داخل کلاس‌ها استفاده شد. انجام آزمایشات تجربی نیز برای اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌های عددی و نیز فراهم کردن داده‌های اولیه حایز اهمیت است.

معادلات حاکم بر حرکت سیالات شامل معادله پیوستگی (معادله بقای جرم) و معادلات ناوراستوکس (معادلات بقای مومنتوم) هستند. معادله پیوستگی (معادله ۱) اصل بقای جرم را شرح می‌دهد.^{۳۹} بقای جرم بیان می‌کند که برای حجم ثابتی از سیال، شار جرمی خالص کل، در حجم باید با تغییرات چگالی متعادل گردد. در معادله ۱، $\hat{u}\hat{u}$ ، $\hat{v}\hat{v}$ و $\hat{w}\hat{w}$ مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در راستاهای x ، y ، و z هستند. در صورتی که چگالی سیال ($\rho\rho$) ثابت فرض شود، رابطه ۱ به شکل رابطه ۲ خواهد شد.^{۴۰} در سیستم مختصات کارتزین، معادلات بقای مومنتوم زمانی که راستای قائم با جهت مثبت به سمت بالا قرار داشته باشد، مانند روابط ۳، ۴، و ۵ است^{۴۱} که $\hat{p}\hat{p}$ فشار، g شتاب ثقلی، t زمان، $f_i f_i$ نیروهای بدنه‌ای، و $\tau_{ij} \tau_{ij}$ تنش‌های



حاصل از لزجت سیال هستند که می‌توان آنها را با توجه به المان‌های سیال به شکل معادله ۶ نوشت. همچنین بر اساس روابط قبل و با ثابت در نظر گرفتن چگالی سیال (با توجه به پایین بودن سرعت و کمتر از ۰/۳ بودن عدد ماخ، جریان تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است)، به صورت معادله ۷ و به شکل تانسوری بازنویسی می‌شود.^{۴۲}

$$(۱) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \hat{w})}{\partial z} = 0$$

$$(۲) \quad \sum_{j=1}^3 \frac{\partial(\hat{u}_j)}{\partial x_j} = 0$$

$$(۳) \quad \frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u}^2) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v} \hat{u}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w} \hat{u}) = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x$$

$$(۴) \quad \frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u} \hat{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v}^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w} \hat{v}) = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y$$

$$(۵) \quad \frac{\partial(\rho \hat{w})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \hat{u} \hat{w}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \hat{v} \hat{w}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \hat{w}^2) = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + f_z$$

for Air Quality Control and Passive Cooling in Existing and New Office Type Buildings", 265-278,

17. Aguilar, et al., "Assessment of Ventilation Rates Inside Educational Buildings in Southwestern Europe", 104204.

18. Han, et al., "A Comparative Analysis of Urban and Rural Residential Thermal Comfort under Natural Ventilation Environment", 139-145.

19. M. Rahiminejad, et al., "Performance of Lightweight and Heavyweight Building Walls with Naturally Ventilated Passive and Active Facades", *Energy and Buildings*, 256 (2022): 111751.

20. H.L. Gough, et al., "Evaluating Single-sided Natural Ventilation Models Against Full-scale Idealised Measurements: Impact of Wind Direction and Turbulence", *Building and Environment Journal*, 170 (2020): 106556.

21. D.A. Olsen, et al., "Steady State Natural Convection in an Empty and Partitioned Enclosure at High Rayleigh Numbers", *Journal of Heat Transfer*, 112 (1990): 640-647.

22. J.W. Elder, "Turbulence Free Convection in a Vertical Slot", *Journal of*

$$(۶) \quad \frac{\tau_{ij}}{\rho} = v \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$(۷) \quad \frac{\partial (\hat{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\hat{u}_i \hat{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[v \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho}$$

معادلات ۳ و ۷ معادلات بقای مومنتوم و جرم نامیده می‌شوند. پس از بررسی مقدار k و به‌دست آوردن نرخ استهلاک انرژی جنبشی، درنهایت شکل نهایی معادلات $k-\epsilon$ به‌صورت معادلات ۸ و ۹ به‌دست می‌آید^{۴۳} که در این روابط، $C_{2\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{1\epsilon}, C_{1\epsilon}, C_{3\epsilon}, C_{3\epsilon}$ ضرایب تجربی هستند که مقادیر آن ارائه شده است.^{۴۴}

$$(۸) \quad \frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \epsilon$$

$$(۹) \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left(v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_{3\epsilon} \beta g_i \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}$$

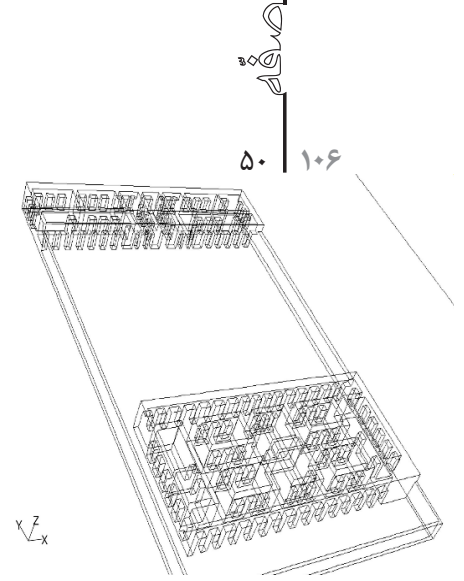
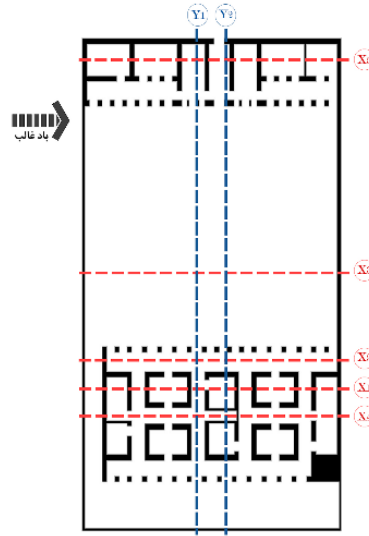
دیواره به‌طور متوسط ۳۰۴ درجه کلونین و دمای محیطی نیز با توجه به آزمون‌های تجربی روی ۳۰۰ درجه کلونین تنظیم شد. آن‌گونه که در «ت ۱۵ تا ۱۷» مشخص است، اگرچه شدت جریان هوا در محدودهٔ خارج از مدرسه و حیاط در ساعات مختلف متغیر و گاهی شدید است، با این‌حال در هیچ‌یک از کلاس‌ها باد شدید جریان ندارد.

با توجه به باد غالب شهر بوشهر، جهت‌گیری خاص ساختمان‌ها و مدل استقرار این بنا در زمین و بر اساس «ت ۱۸ تا ۲۱» جریان هوایی در معابر اطراف بنا و فضاهای نیمه‌باز ایجاد و موجب مکش هوا از فضاهای بسته می‌گردد. به‌منظور انجام شبیه‌سازی‌ها در مدل انتخابی، بادی با سرعت ۳ متر بر ثانیه و در امتداد طولی حیاط و از شمال غرب جریان می‌یابد. با توجه به جنس آجری دیوارهای مدرسه، همان‌گونه که در این تصاویر مشاهده می‌شود، جریان هوای خارج در همهٔ فضاهای خالی اطراف با سرعتی نسبتاً ثابت برقرار است، با این‌حال هوای گردابه‌ای بسیار آرامی در کلاس‌ها جریان می‌یابد.

به‌منظور انجام شبیه‌سازی‌ها، جریان باد با سرعت ثابت میانگین ۳ متر بر ثانیه و از شمال غرب مطابق با آزمون تجربی و «ت ۱» در امتداد طولی حیاط و کلاس‌ها وارد مدل می‌شود. حجم کلی (ت ۱۳) شبکه‌بندی شد. حجم بنا با استفاده از پیش‌پردازشگر گمبیت از نوع ت^{۴۵} بوده که پس از ۵۷۶۱ تکرار در نرم‌افزار فلوئنت باقی‌مانده‌ها هم‌گرا شد. بدین‌گونه که تعداد ۳۵۷۵۳۲ سلول شش‌وجهی سه‌بعدی مطابق پژوهش‌های مشابه با استفاده از روش ت^{۴۵} (مدل استاندارد شبکه‌های پیچیده) پدید آمد. پس از اعتبارسنجی، ابتدا شبیه‌سازی با استفاده از تعداد شبکه‌های مختلف انجام شد. به‌این‌صورت که با افزایش شبکه‌ها از عدد ۱۰۰ هزار به بعد، نتایج هم‌گرا شد. به‌دلیل اینکه شرایط پژوهش در حالت پایا فرض شد و مؤلفهٔ دما جزو متغیرهای مورد نظر پژوهش نبود، از معادلات انرژی صرف‌نظر شد. جنس دیوارها نیز با توجه به سابقهٔ ساختمان مدرسه و بررسی‌های میدانی و آزمون‌های تجربی، از جنس آجر در گرفته و در بخش بازشوها، با توجه به اینکه بازشوها از متغیرهای این پژوهش است، به‌صورت باز فرض شد. دمای

۶. یافته‌های پژوهش

مطابق «ت ۱۵ تا ۲۱»، در شبیه‌سازی‌ها و با توجه به واحدهای سرعت جریان هوا برحسب متر بر ثانیه و فشار برحسب پاسکال، باد غالب خارجی که از سمت غرب و شمال غرب می‌وزد، با برخورد به دیوار غربی مدرسه شکسته می‌شود و به طرفین و به سمت بالا تغییر مسیر می‌یابد که با توجه به «ت ۲۰»، سرعت هوا در مقطع X_3 در حیاط مدرسه، این برخورد با افزایش فشار در پشت و بالای دیوار و افزایش سرعت در پشت دیوار نسبت به سرعت جریان هوای غالب همراه است. کمترین سرعت و فشار هوا در تراز نزدیک به سطح حیاط است و با افزایش ارتفاع تا تراز میانی پنجره، جریان هوا افزایش دارد که این نتایج با داده‌های تجربی نیز تطابق دارد. به بیان دیگر، دانش آموزان در تراز ۱٫۶ متر از سطح حیاط (یا ۱ متر از سطح کلاس‌ها یا حدود تراز ارتفاعی نشستن در کلاس)، جریان آرام با آسایش نسبی وجود دارد و در تراز بالاتر یعنی حدود ۲٫۴ متر از سطح حیاط،



ت ۲۰ (پایین، چپ). بردارهای جریان هوا در مقطع X_3 (m/s).

ت ۲۱ (صفحهٔ روبه‌رو). بردارهای جریان هوا در Y_1 (m/s).

ت ۱۸ (پایین، راست). بردارهای جریان هوا در مقطع X_1 (m/s).

ت ۱۹ (پایین، وسط). بردارهای جریان هوا در مقطع X_2 (m/s).

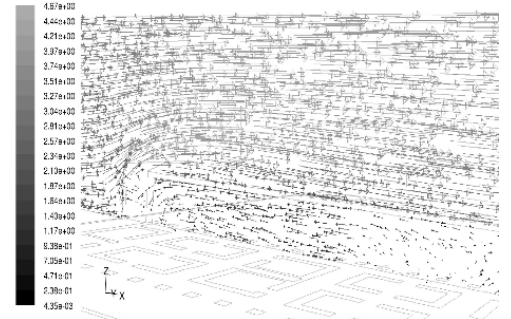
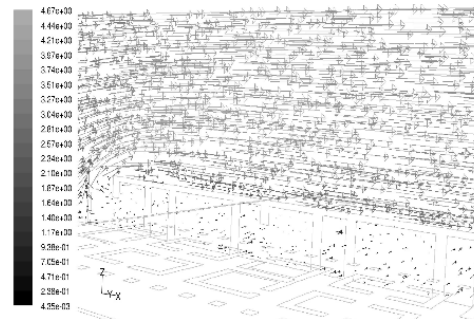
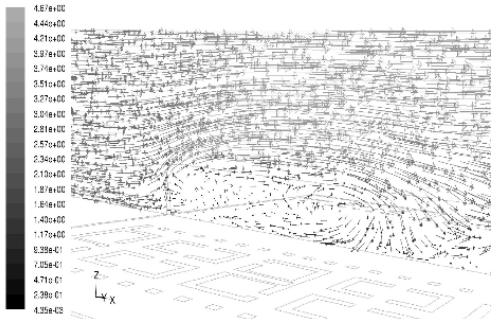
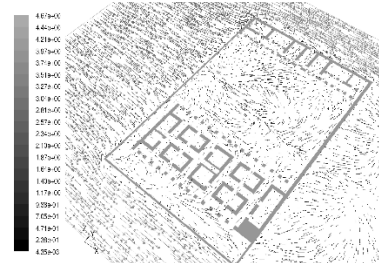
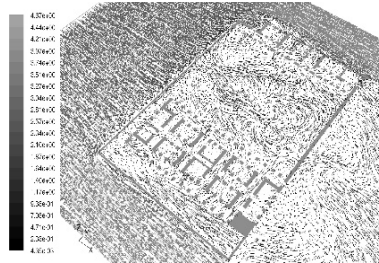
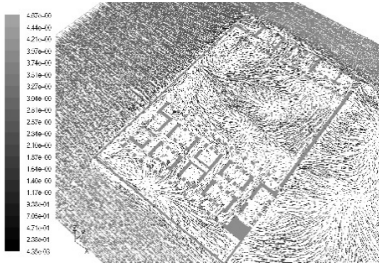
ت ۱۳ (بالا، راست). حجم کلی و سه بعدی مدرسه.

ت ۱۴ (بالا، چپ). موقعیت مقاطع.

ت ۱۵ (میان، راست). بردار شدت و مسیر جریان هوا در تراز ۰٫۶ متر از سطح حیاط.

ت ۱۶ (میان، وسط). بردار شدت و مسیر جریان هوا در تراز ۱٫۶ متر از سطح حیاط.

ت ۱۷ (میان، چپ). بردار شدت و مسیر جریان هوا در تراز ۲٫۴ متر از سطح حیاط.



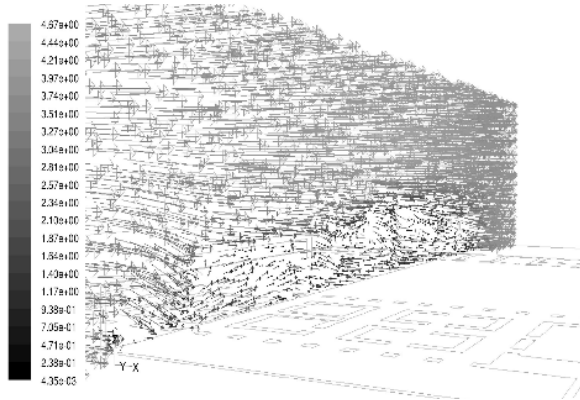
→
Fluid Mechanics, 23 (1965):
 99-111; P.W. Giel and F.W.
 Schmidt, "All Experiment
 Study of High Rayleigh
 Number Natural Convection",
*An Enclosure Proceeding of
 the 8th International Heat
 Transfer Conference*, 4, 1986,
 1459-1464; R. Cheesewright,
 "Turbulent Natural
 Convection from a Vertical
 Plane Surface", *Journal of Heat
 Transfer, Transaction of ASME*,
 (1968): 1-9.

23. Y. Nagano and N. Tagawa,
 "An Improved k-ε Model
 for Boundary Layer Flows",
Journal of Fluids Engineering,
 112 (1990): 33-39.

۲۴. رهایی، «هویت فرهنگی و اثرات
 آن بر روش‌های بومی تهویه طبیعی
 بازار قدیم دزفول، راسته صنعتگران»،
 ۳۹-۴۶.

25. Rahaei, "Effects of
 Architectural Somatic
 Variables on Mixed Air
 Conditioning Systems'
 Efficiency in Industrial
 Buildings", *Armanshahr
 Architecture & Urban
 Development Journal*, no. 12
 (2014): 69-81.

26. V. Sribanurekha, et al.,
 "Effect of Different Ventilation
 Conditions on Indoor CO2
 Levels", in *International
 Conference on Disaster
 Resilience At: Kandalama, Sri
 Lanaka*, 2011.



بیانگر این است که با توجه به فرم بازشوها و راهروها، جریان باد مطلوب و ملایم است و آشفته‌گی و اختلاف فشار هوا درون کلاس‌ها ناچیز است.

جریان هوای خارج در همه فضاها ی خالی اطراف با سرعتی نسبتاً ثابت برقرار است، باین‌حال هوای بسیار آرام گردابه‌ای در کلاس‌ها جریان دارد. از آنجاکه جریان هوا از منطقه فشار بیشتر به فشار کمتر است، باد در سرتاسر مسیر راهروها با توجه به ترکیب خاص خود در اطراف کلاس‌ها همواره برقرار است و صرفاً در فضاهایی جریان می‌یابد که بازشویی برای خروج هوا در آنها تعبیه شده باشد.

جریان برقرار شده در کلاس‌هایی که با راهروهای جانبی محصور هستند و بازشوهای مناسب دارند، به‌صورت متوسط، حداقل ۰/۰۵ متر بر ثانیه است و هوای آلوده داخل با توجه به وضعیت بازشوهای اصلی (رواق‌ها و جبهه مشرف به حیاط) از حیاط خارج می‌شود. مقایسه شبیه‌سازی‌ها بیانگر این است که هوا در کلاس‌های میانی با کیفیت بسیار بهتری جریان دارد و در هیچ نقطه آن رکود هوا ایجاد نمی‌شود. ضمن اینکه بازشوهای تعبیه شده موجب جریان یافتن همیشگی هوا در داخل کلاس‌ها (به دلیل اختلاف دمای داخل و خارج از دو سمت) می‌شوند. بدین ترتیب از محبوس ماندن هوای مسن در فضای داخلی جلوگیری می‌شود.

سرعت باد محسوس تر خواهد بود. از شبیه‌سازی‌های انجام شده چنین برمی‌آید که حجمی از شدت جریان هوای وارد شده به مدرسه، از ورودی آن در جبهه شمالی تأمین می‌شود و باز و بسته بودن آن، شدت جریان هوای داخل حیاط و فضای کلاس‌ها را تنظیم می‌کند که به باز بودن این در در مدت استفاده از فضای مدرسه نیاز هست و با توجه به مشاهدات بیان شده، ورودی مدرسه به گونه‌ای است که دید به داخل آن را محدود و امکان باز بودن در را فراهم می‌کند.

همان‌گونه که در بردارهای «ت ۱۵ تا ۲۱» مشخص است، اگرچه شدت جریان هوا در محدوده خارج از مدرسه و بعضاً در حیاط در بعضی موارد شدید است، باین‌حال در هیچ‌یک از کلاس‌های داخلی باد جریان ندارد. با توجه به باد غالب و جهت‌گیری خاص ساختمان‌ها و نیز مدل استقرار این بنا در زمین، موجب جریان یافتن هوا در معابر اطراف بنا و در فضاهای خالی آن و مکش هوای آلوده داخلی از طریق راهروهای جانبی می‌شود که در چهار وجه کلاس‌ها همراه با باز شو در دو طرف کلاس هستند؛ حتی بدون نیاز به تأمین نور و صرفاً برای تأمین تهویه، که همین امر باعث تسهیل فرایند تهویه طبیعی در این مدرسه شده است (ت ۱۸). با توجه به اینکه جریان باد غالب در امتداد بازشوها آشفته‌گی کمی درون کلاس‌ها ایجاد می‌کند، اما راهروها به ایجاد جریان هوا به داخل فضاها کمک می‌کند. در «ت ۱۸» مشخص است که در مسیر برخورد باد غالب با دیواره مدرسه، تمرکز بردارهای سرعت بیشتر می‌شود، در نتیجه فشار بیشتری درون حیاط ایجاد می‌کند. این فشار در «ت ۱۹ تا ۲۱»، که نشانگر مقاطع درون فضای بسته هستند، نیز وجود دارد و از آنجاکه متغیرهای مد نظر این پژوهش، شرایط جریان هوا درون کلاس‌هاست، فشار ایجاد شده درون کلاس‌ها با توجه به تمرکز بردارهای سرعت ناچیز است. تصاویر بردارهای سرعت نشان‌دهنده فشار هوا در بخش‌های مختلف مدرسه و

نتیجه‌گیری

بنا در زمین موجب جریان یافتن هوا در معابر اطراف بنا و در فضاهای خالی آن و ایجاد خلأ نسبی و مکش هوای مسن داخل کلاس‌ها گردیده است و هوای جانسین نیز از طریق بازشوها تأمین و باعث تسهیل فرایند تهویه طبیعی در این مدرسه می‌شود.

۴- معماری بومی قدیم بوشهر، تحت تأثیر مسائل اقلیمی این منطقه است.

۵- ترکیب خطی پلان مدرسه و نیز استفاده هوشمندانه از معماری بومی بوشهر موجب شده تا همیشه هوای آرامی در کلاس‌ها جریان داشته باشد و سرعت باد خارجی هر قدر که باشد، تأثیری در بر هم زدن آن ندارد.

۶- با توجه به مشاهدات تجربی و شبیه‌سازی‌ها، با وجود آنکه هندسه کلاس‌ها یکسان است، اما هوا در همه کلاس‌ها به یک اندازه در جریان نیست و متغیر است.

به این ترتیب معماری قدیم بوشهر ایفای نقش کرده و ضمن هویت‌بخشی به معماری، با دانش مهندسی و فناوری زمان، به منظور برقراری شرایط آسایش و برطرف کردن مشکلات تهویه طبیعی، در قالب روشی منحصربه‌فرد همراه شده است.

مدرسه سعادتی یکی از فضاهای آموزشی بوشهر است که در آن تهویه طبیعی برای ایجاد شرایط مناسب نقش کلیدی دارد. مشاهدات نشان دادند که مدرسه سعادتی در سمت باد غالب قرار دارد که به لحاظ اقلیمی مناسب است. بر اساس شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات، نتایج به شرح زیر است:

۱- سطح کلاس‌ها در حدود ۶۰ سانتیمتر بالاتر از سطح حیاط ساخته شده تا ضمن تعریف حریم‌ها، از رطوبت زمین نیز به دور باشند.

۲- مطابق شبیه‌سازی‌ها، اختلاف سطح بین تراز حیاط و کلاس‌ها موجب جریان یافتن هوای آرام و دور از رطوبت زمین در فضای کلاس‌ها می‌شود.

۳- جریان هوا در حیاط مدرسه با وجود دیوار شمالی که، به علت قرارگیری در جهت باد غالب، کوتاه‌تر است، قابل قبول است و در بیشتر ساعات شبانه‌روز هوا در مدرسه در جریان است.

۴- در این مدرسه تهویه کلاس‌ها از طریق بازشوه‌های متعدد در دو جداره روبه‌روی هم به همراه راهروهای عریض در هر چهار وجه کلاس‌ها صورت می‌گیرد.

۵- باد غالب، جهت‌گیری خاص ساختمان، و نیز مدل استقرار

27. C. Teodosiu, et al., "Appropriate CFD Turbulence Model for Improving Indoor Air Quality of Ventilated Spaces". *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, vol. 10, no. 4 (2015): 28-42; K. Kompatscher, et al., "Coupled Heat, Moisture and CFD Modeling in the Built Environment". in *COMSOL Conference*, Rotterdam, The Netherlands, October 2017, 18-20; S. Asfour and B. Gadi, "A Using CFD to Investigate Ventilation Characteristics of Vaults as Wind- inducing Devices in Buildings", *Journal of Applied Energy*, 85 (2008): 1126-1140.

28. X. Jin and C. Meng, "Study on Impact of Window Opening Modes on Motion of Indoor PM2.5", *Architecture Technology*, 45 (2014): 1022-1025.

29. Yao and Zhao, "Window Opening Behavior of Occupants in Residential Buildings in Beijing". *Building and Environment*, 124 (2017): 441-449.

30. C.H. Huang, et al., "Impacts of Using Auto-mode Portable Air Cleaner on Indoor PM_{2.5} Levels, An Intervention Study", *Building and Environment Journal*, 188 (2021): 107444.

References

Aflaki, A., N. Mahyuddin, Z.A.K. Mahmoud, and M.R. Baharum. "A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates". *Energy and Buildings*, vol. 101 (2015): 153-162.

Aguilar, Antonio J., Maria L. de la Hoz-Torres, N'elson Costa, Pedro Arezes, Maria D. Martínez-Aires, and Diego P. Ruiz. "Assessment of Ventilation Rates inside Educational Buildings in Southwestern Europe: Analysis of Implemented Strategic Measures". *Journal of Building Engineering*. 51(12) (2022): 104204.

Amidpour, M. "Investigating the Effects of Using Smokeless Heaters on Indoor Air Quality, Research Project". Khaje

Nasir-o-din Toosi University, department of mechanic, Client: Optimizing Iran's fuel consumption co, 2009. (In Persian)

Ascione, F., L. Bellia, and A. Capozzoli. "A Coupled Numerical Approach on Museum Air Conditioning: Energy and Fluid-dynamic Analysis". *Journal of Applied Energy*, 103 (2013): 416-427.

Asfour, S. and B. Gadi. "A Using CFD to Investigate Ventilation Characteristics of Vaults as Wind- inducing Devices in Buildings". *Journal of Applied Energy*, 85 (2008): 1126-1140.

Bahrani, H.R., E. Ranjbar, and S. Ahmadi. "An Analysis of the Function of External Senasir Types and Their Effects on the Wind Flow in the Historical Part of Bushehr". *Naqshejahan-*

۳۱. جلیل شاعری و همکاران، «بررسی دما، رطوبت نسبی و سرعت جریان باد در ساختمان های سنتی مسکونی بوشهر در فصل گرما؛ نمونه موردی عمارت گلشن و عمارت دهدشتی»، نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، دوره ۲۲، ش. ۴ (زمستان ۱۳۹۶): ۹۳-۱۰۵.

۳۲. احسان رنجبر و همکاران، «خلاقیتهای طراحی اقلیمی متناسب با جریان باد در بافت قدیم بوشهر»، باغ نظر، ش. ۱۳ (بهار ۱۳۸۹): ۱۷-۳۴.

۳۳. حمیدرضا بحرانی و همکاران، «تحلیل رفتار گونه‌های شناشیر بیرونی و تأثیر آن‌ها بر جریان باد در بافت تاریخی بوشهر»، نقش جهان، دوره ۸، ش. ۳ (پاییز ۱۳۹۷): ۱۷۹-۱۸۶.

34. A. Aflaki, et al., "A Review on Natural Ventilation Applications through Building Façade Components and Ventilation Openings in Tropical Climates", *Energy and Buildings*, vol. 101 (2015): 153-162; C.M. Calama-Gonzalez, et al., "Thermal Comfort Prediction of the Existing Housing Stock in Southern Spain through Calibrated and Validated Parameterized Simulation Models", *Energy and Buildings*, vol. 254 (2022).

35. CFD

۳۶. نیلوفر نیکقدم، «تأثیر باد و آفتاب در تعدیل شرایط گرمایی خانه های بوشهر؛ نمونه موردی: خانه گلشن». معماری و شهرسازی ایران، ش. ۱۲ (پاییز و زمستان ۱۳۹۵): ۲۹-۴۶.

Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning, no. 8 (2018): 179-186. (In Persian)

Betts, P.L. and I.H. Bokhari. "Experiments on Turbulent Natural Convection in an Enclosed Tall Cavity". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 9 (2000): 165-194.

Blake, G., E. Schlichting, and U. Zimmerman. "Water Recharge in a Soil with Shrinkage Cracks". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 (1973): 669-672.

Calama-Gonzalez, C.M., R. Suarez, and A. Luis Leon-Rodriguez. "Thermal Comfort Prediction of the Existing Housing Stock in Southern Spain through Calibrated and Validated Parameterized Simulation Models". *Energy and Buildings*, vol. 254 (2022).

Canonsburg, T. *ANSYS Fluent User's Guide*, Release 18.1, 2017.

Cheesewright, R. "Turbulent Natural Convection from a Vertical Plane Surface". *Journal of Heat Transfer, Transaction of ASME*, (1968): 1-9.

Chen, Q. "Comparison of Different $k-\epsilon$ Models for Indoor Air flow Computations". *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, vol. 28, no. 3 (1995): 353-369.

Chen, Y., Z. Tong, Y. Zheng, H. Samuelson, and L. Norford. "Transfer Learning with Deep Neural Networks for Model Predictive Control of HVAC and Natural Ventilation in Smart Buildings". *Journal of Cleaner Production*, 254 (2020): 119866.

Elder, J.W. "Turbulence Free Convection in a Vertical Slot". *Journal of Fluid Mechanics*, 23 (1965): 99-111.

Figuroa-Lopez, A., A. Arias, X. Oregi, and I. Rodriguez. "Evaluation of Passive Strategies, Natural Ventilation and Shading Systems, to Reduce Overheating Risk in a Passive House Tower in the North of Spain during the Warm Season". *Journal of Building Engineering*, 43 (2021): 102607.

Giel, P.W. and F.W. Schmidt. "All Experiment Study of High Rayleigh Number Natural Convection". *An Enclosure Proceeding of the 8th International Heat Transfer Conference*, 4, 1986, 1459-1464.

Gough, H.L., J.F. Barlow, Z. Luo, M.-F. King, C.H. Halios, and C.S.B. Grimmond. "Evaluating Single-sided Natural Ventilation Models Against Full-scale Idealised Measurements: Impact of Wind Direction and Turbulence". *Building and Environment Journal*, 170 (2020): 106556.

Grout, L. and D. Wang. *Research Methods in Architecture*. Transl. A. Eynifar, Tehran: Published by University of Tehran, 2006. (In Persian)

Han, J., W. Yang, G. Zhang, Q. Zhang, and D.J. Moschandreas. "A Comparative Analysis of Urban and Rural Residential Thermal Comfort under Natural Ventilation Environment". *Energy and Buildings*, 41 (2009): 139-145.

Heiselberg, P. "Principles of Hybrid Ventilation". Annex 35: *Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings*, 2002, 1-75.

Huang, C.H., et al. "Impacts of Using Auto-mode Portable

Air Cleaner on Indoor PM2.5 Levels, An Intervention Study". *Building and Environment Journal*, 188 (2021): 107444.

Indraganti, M. and D. Boussaa. "Comfort Temperature and Occupant Adaptive Behavior in Offices in Qatar during Summer". *Energy and Building*, 150 (2017): 23-36.

Indraganti, M., R. Ooka, H.B. Rijal, and G.S. Brager. "Adaptive Model of Thermal Comfort for Offices in Hot and Humid Climates of India". *Building and Environment Journal*, 74 (2017): 39-53.

Izadyar, N., W. Miller, B. Rismanchi, and V. Garcia-Hansen. "Impacts of Façade Openings' Geometry on Natural Ventilation and Occupants' Perception: a Review; Build". *Building and Environment Journal*, 170 (2020): 106613.

Izadyar, N., W. Miller, B. Rismanchi, and V. Garcia-Hansen. "A Numerical Investigation of Balcony Geometry Impact on Single-sided Natural Ventilation and Thermal Comfort". *Building and Environment Journal*, vol. 177 (2020): 106847.

Jalilian, Sh. and M. Tahbaz. *The Principle of Architecture Design Compatible with the Climate in Iran with an Approach to Mosque Architecture*. Tehran: Shahid Beheshti University Publish, 2008. (In Persian)

Jin, X. and C. Meng. "Study on Impact of Window Opening Modes on Motion of Indoor PM2.5". *Architecture Technology*, 45 (2014): 1022-1025.

Jomehzadeh, F., H.M. Hussen, J.K. Calautit, P. Nejat, and M.S. Ferwati. "Natural Ventilation by Windcatcher (Badgir): A Review on the Impacts of Geometry, Microclimate and Macroclimate". *Energy and Buildings*, 226 (2020): 110396.

Jomehzadeh, F., P. Nejat, J.K. Calautit, et al. "A Review on Windcatcher for Passive Cooling and Natural Ventilation in Buildings, Part 1: Indoor Air Quality and Thermal Comfort Assessment". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 (2017): 736-756.

Khedari, J., B. Boonsri, J. Hirunlabh. "Ventilation Impact of Solar Chimney on Indoor Temperature Fluctuation and Air Change in a School Building". *Energy and Buildings*, 32(1) (2000): 89-93.

Kompatscher, K., S. Kochen, A.W.M. Van Schijndel, and H.L. Schellen. "Coupled Heat, Moisture and CFD Modeling in the Built Environment". in *COMSOL Conference*, Rotterdam, The Netherlands, October 2017, 18-20.

Lai, D., S. Jia, Y. Qi, and J. Liu. "Window-opening Behavior in Chinese Residential Buildings across Different Climate Zones". *Building and Environment*, 142 (2018): 234-243.

Larsen, T.S., C. Plesner, V. Leprince, F.R. Carrie, and A.K. Bejder. "Calculation Methods for Single-sided Natural Ventilation: Now and Ahead". *Energy and Buildings*. 177 (2018): 279-289.

Ledo Gomis, L., M. Friorentini, and D. Daly. "Potential and Practical Management of Hybrid Ventilation in Buildings". *Energy and Buildings*, 231 (2021): 110597.

Lyu, W., X. Li, W. Shi, B. Wang, and X. Huang. "A General

- Method to Evaluate the Applicability of Natural Energy for Building Cooling and Heating: Revised Degree Hours". *Energy and Buildings*, 250 (2021): 111277.
- Meng, X., Y. Wnag, X. Xing, and Y. Xu. "Experimental Study on the Performance of Hybrid Buoyancy-driven Natural Ventilation with a Mechanical Exhaust System in an Industrial Building". *Energy and Buildings*, 208 (2020): 109674.
- Miri, P. and P. Babakhani. "On the Failure of the Only Vernacular Windcatcher in the Mountainous Region of Western Iran: Opportunities for Energy-efficient Buildings". *Journal of Cleaner Production*, 295 (2021): 126383.
- Nagano, Y. and N. Tagawa. "An Improved k-ε Model for Boundary Layer Flows". *Journal of Fluids Engineering*, 112 (1990): 33-39.
- Nickghadam, N. "The Effect of Wind and Sun in Adjusting the Thermal Conditions of Bushehr Houses, Case Example: Golshan House". *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, no. 2 (2016): 29-46. (In Persian)
- Nomura, M. and K. Hiyama. "A Review: Natural Ventilation Performance of Office Buildings in Japan". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74 (2017): 746-754.
- Olsen, D.A., L.R. Glicksman, and H.M. Ferm. "Steady State Natural Convection in an Empty and Partitioned Enclosure at High Rayleigh Numbers". *Journal of Heat Transfer*, 112 (1990): 640-647.
- Omrani, S., V. Garcia-Hansen, B. Capra, and R. Drogemuller. "Natural Ventilation in Multi-storey Buildings: Design Process and Review of Evaluation Tools". *Building and Environment*, 116 (2017): 182-194.
- Rahaei, O. "Cultural Dentity and its Effects on Natural Ventilation Methods in Dezful's Cultural Bazaar". *Baghe-Nazar*, no. 24 (2013): 39-46. (In Persian)
- _____. "Effects of Architectural Somatic Variables on Mixed Air Conditioning Systems' Efficiency in Industrial Buildings". *Armanshahr Architecture & Urban Development Journal*, no. 12 (2014): 69-81.
- _____. "Investigation of Physical Changes in Central Courtyards on the Pattern of Air Flow Inside Them in Qajar Period Houses in Isfahan by CFD Method - Case Study: Labaf House". *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, no. 9 (2021). (In Persian)
- Rahaei, O. and H.R. Azemati. "Improving the Quality of Natural Ventilation in Classrooms of Mazandaran Province Based on the Position of the Openings Using CFD Method". *Journal of Iranian Architecture & Urbanism*, no. 11 (2020): 57-71. (In Persian)
- Rahiminejad, M., A. Louis Marie Paris, H. Ge, and D. Khovalyg. "Performance of Lightweight and Heavyweight Building Walls with Naturally Ventilated Passive and Active Facades". *Energy and Buildings*, 256 (2022): 111751.
- Ranjbar, E., M. Pourjafar, and K. Khaliji. "Innovations in Climatic Designing Due to the Wind Flowing Through The Old Bushehr". *Baghe-Nazar*, no. 13 (2010): 17-34. (In Persian)
- Rudy, W. *The Universities of Europe, 1100-1914: a History*. Rutherford [NJ]: Fairleigh Dickinson, London, Cranbury: University Press, 1984.
- Schlichting, H. and E. Truckenbrodt. *Aerodynamics of the Airplane*. McGraw-Hill Companies, 1979.
- Schulze, T., D. Gürlich, and U. Eicker. "Performance Assessment of Controlled Natural Ventilation for Air Quality Control and Passive Cooling in Existing and New Office Type Buildings". *Energy and Buildings*, 172 (2018): 265-278.
- Shaeri, j., M. Yaghoubi, M. Aliabadi, and R. Vakilinazhad. "Evaluation of Temperature, Relative Humidity and Wind Speed of Traditional Houses of Bushehr in Warm Season (Case Study: Golshan and Dehdashti Houses)". *Honar-ha-ye-Ziba Memari-va-Shahrsazi*, no. 22 (2018): 93-105. (In Persian)
- Shafiei Fini, A. and A. Moosavi. "Effects of Wall Angularity of Atrium on Buildings Natural Ventilation and Thermal Performance and CFD Model". *Energy and Buildings*, 121 (2016): 265-283.
- Sribanurekha, V., S.N. Wijerathne, L.H.S. Wijepala, and C. Jayasinghe. "Effect of Different Ventilation Conditions on Indoor CO2 Levels". in International Conference on Disaster Resilience At: Kandalama, Sri Lanaka, 2011.
- Teodosiu, C., V. Ilie, and R. Teodosiu. "Appropriate CFD Turbulence Model for Improving Indoor Air Quality of Ventilated Spaces". *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, vol. 10, no. 4 (2015): 28-42.
- Vassella, C.C., J. Koch, A. Henzi, A. Jordan, R. Waeber, R. Iannaccone, and R. Charri'ere. "From Spontaneous to Strategic Natural Window Ventilation: Improving Indoor Air Quality in Swiss Schools". *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 234 (2021): 113746.
- Versteeg, H. and W. Malalasekera. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics". *Finite Volume Method, Essex*, Longman Scientific and Technical, 1995.
- Wilcox, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW industries La Canada, CA, 1998.
- Wu, Y., N. Gao, J. Niu, and Q. Cao. "Numerical Study on Natural Ventilation of the Wind Tower: Effects of Combining with Different Window Configurations in a Low-rise House". *Building and Environment*, 188 (2021): 107450.
- Yao, M. and B. Zhao. "Window Opening Behavior of Occupants in Residential Buildings in Beijing". *Building and Environment*, 124 (2017): 441-449.
- Yin, H., C. Liu, and L. Zhang. "Measurement and Evaluation of Indoor Air Quality in Naturally Ventilated Residential Buildings". *Indoor Built Environment Journal*, no. 13 (2019): 1-17.
- Numerical Simulation of Indoor Air Flow Behavior Under the Effect of Openings and Corridors in Saadat Bushehr School by Fluent Software
۳۷. رنجبر و همکاران، «خلاقیت‌های طراحی اقلیمی متناسب با جریان باد در بافت قدیم بوشهر»، ۱۷-۳۴
۳۸. سرعت‌سنج لوترن (Lutron) مدل YH-90HT
39. G. Blake, et al., "Water Recharge in a Soil with Shrinkage Ccracks". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37 (1973): 669-672.
40. Chen, "Transfer Learning with Deep Neural Networks for Model Predictive Control of HVAC and Natural Ventilation in Smart Buildings", 119866.
41. H. Versteeg and W. Malalasekera, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics". *Finite Volume Method, Essex*, Longman Scientific and Technical, 1995.
42. H. Schlichting and E. Truckenbrodt, *Aerodynamics of the Airplane* (McGraw-Hill Companies, 1979).
43. D.C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD* (DCW industries La Canada, CA, 1998).
44. W. Rudy, *The Universities of Europe, 1100-1914: a History* (Rutherford [NJ]: Fairleigh Dickinson, London, Cranbury: University Press, 1984).
45. TET