



Examining the changes in the thermal behavior of the space by considering the role of "water" in the basement and the courtyard of a; case study model of Yazd houses

Maryam Kiaee¹, Aliakbar Heidari²✉, and Hamid Eskandari³

1. Postdoctoral Researcher in Architecture, Department of Architecture, Faculty of Technical Engineering, University of Yasouj, Yasouj, Iran. E-mail: maryam_20k@yahoo

2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Technical Engineering, University of Yasouj, Yasouj, Iran. E-mail: aliakbarheidari.iust@gmail.com

3. Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Technical Engineering, University of Yasouj, Yasouj, Iran. E-mail: eskandari.auy@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 22 March 2024

Received in revised form 1

May 2024

Accepted 28 May 2024

Available online 29 June 2024

Keywords:

thermal behavior,
thermal comfort,
basement,
Yard,
water pond.

ABSTRACT

Objective: Iranian architecture has historically confronted various climatic challenges in desert regions, often leading to innovative solutions. One such challenge is the increase in temperature coupled with decreased relative humidity, particularly during the hottest days of the year. A sustainable climatic solution for achieving thermal comfort and mitigating harsh weather conditions in this region involves the integration of central courtyards and basements. However, the lack of moisture in the air renders the mere construction of these spaces insufficient for thermal comfort. To address this, pond spaces were incorporated into the yard and, in some cases, into the cellar or basement to help lower temperature and increase relative humidity.

Method: This study employs descriptive and analytical methods alongside library and internet research. Additionally, simulation techniques were utilized to explore the impact of the pond factor within the two spaces of the cellar and yard.

Results: The findings indicate that introducing a moisture source (pond) results in an average temperature reduction of up to 3.5 degrees Celsius in the yard and up to 2.5 degrees Celsius in the basement compared to scenarios without a pond on the hottest day of the year. Furthermore, the presence of a pond in the yard does not lead to significant changes in the temperature and humidity levels of the basement, even with air circulation.

Conclusions: While the pond is essential for reducing the temperature of the yard itself and cannot be omitted from the design of desert homes, its role in enhancing thermal comfort within the cellar is particularly notable during peak heat hours. In the pond scenario, the temperature difference compared to the outside reaches approximately 9 degrees Celsius, whereas the scenario without the pond yields a difference of about 5 degrees. This underscores the undeniable importance of the water pond and the associated humidity in achieving thermal comfort.

Cite this article: Kiaee, Heidari and Eskandari (2024). Examining the changes in the thermal behavior of the space by considering the role of "water" in the basement and the courtyard of a case study (model of Yazd houses), Housing and Rural.



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22034/43.186.4>

Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In this century, the crisis of energy consumption and environmental issues have significantly impacted various human activities. As a result, architectural design faces numerous challenges in addressing these crises. This situation is particularly pronounced in hot and dry regions, where high temperatures and low humidity exacerbate the difficulties. To tackle these challenges, traditional Iranian architecture has provided innovative solutions, drawing from centuries of experience in sustainable design to cope with harsh climatic conditions. One of the creative strategies for achieving thermal comfort in native houses of hot and dry regions in Iran is the utilization of basement spaces. Often, these basements are integrated with water tanks to enhance thermal comfort. This space is known as "hozkhaneh" in traditional Iranian architecture. In addition to the pool, a "pond" is typically created in the central courtyard, serving to cool both the courtyard and the surrounding rooms by facilitating air movement from the pond into the interiors. Furthermore, the incorporation of a window in the upper section of the basement wall allows for additional air circulation. The two-way connection between the wind deflector and both the room and basement leads to effective ventilation and the generation of air drafts in two directions—through the window and the wind deflector opening. Such configurations, featuring a pond in both the basement and central courtyard, are optimal for ventilation (temperature and humidity conditioning) (Saljoughinejad & Rashidi Sharifabad, 2015). Traditionally, the "pool" has played a crucial role in these houses, often situated prominently in the courtyard or occasionally in the cellar. However, the provision of such features has not always been feasible due to water scarcity in these regions. Several experimental studies have explored methods for achieving thermal comfort in hot and dry climates, revealing that various factors influence this quality within interior spaces. One critical factor is the presence of humidity. Therefore, having a permanent water source, such as a pond, can significantly contribute to thermal comfort. However, it is essential to determine under which conditions the presence of water is most effective and to what extent it influences thermal comfort. Accordingly, this research aims to compare and analyze the differences in "temperature" and "humidity" when the pond is situated in the yard versus the basement. Four types of traditional buildings featuring a central courtyard and a cellar were selected as case studies for this analysis: - Type 1: Water tank located in both the yard and the cellar. - Type 2: Water tank located solely in the basement. - Type 3: Water tank located only in the yard. - Type 4: No water basin present in either space. This research intends to quantitatively measure the impact of water on thermal comfort through simulation. For this purpose, the variables of "temperature" and "relative humidity" will be simulated using Autodesk CFD software across all four identified scenarios. Hence, the primary research question can be articulated as follows: "To what extent does the presence of water in these spaces affect changes in temperature and relative humidity, ultimately influencing the thermal comfort of the 'cellar' and 'yard' areas in houses situated in desert environments?"

Method

To address the research question, this study employs numerical simulation. The simulation will be conducted in a hypothetical house modeled after the architectural patterns observed in Yazd city, as described in the previous section. In this approach, constant dependent variables, specifically "temperature" and "relative humidity," will be measured in both the basement and

yard areas. To calculate the average temperature of these spaces, measurement points were selected and highlighted in red in Figure 4, with diagonal connections made between them. Each line comprises 100 points, strategically positioned to encompass areas where temperature and humidity fluctuations may occur due to the presence of the pond. The average temperature for each line was recorded, and the corresponding data for relative humidity and temperature are presented in Table 4.

Sampling Procedures

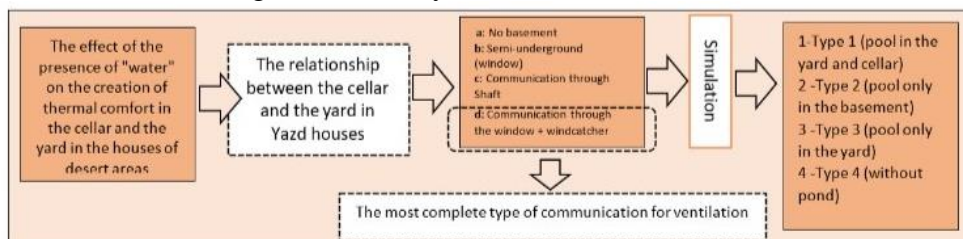
The simulation utilized Autodesk CFD software to measure temperature conditions within a closed environment. This software allows for the analysis of the thermal behavior of fluids in a simulated sample through a CFD modeling approach. This method provides insights into the passive behavior of building elements and aids in the design of ventilation systems and optimal energy management in underground spaces (Porrás-Amores et al., 2019). The numerical results obtained under various pond placements—including both in the yard and cellar (Type 1); exclusively in the cellar (Type 2); exclusively in the yard (Type 3); and none (Type 4)—were compared to evaluate the impact of water on reducing temperature, increasing relative humidity, and enhancing thermal performance in the specified conditions.

Sample Size, Power, and Precision

To improve the accuracy of temperature measurements and enhance the validity of the results, data extracted from Table 3 was utilized, focusing on dry temperature readings at different times. These readings were processed using the software, yielding results for 12 distinct hours on the hottest day of the year, based on recorded average temperatures. The findings are compiled in Tables 6 and 7. Comparisons were made by analyzing both numerical and graphical results generated by AutoCAD CFD software. The research methodology is descriptive and analytical.

Mixed Methods Research Validation

To validate the software, CFD simulation results were compared with experimental data obtained from the research conducted by Carreto-Hernandez et al. (2024). This previous study evaluated air temperature and relative humidity in a room equipped with a wind deflector under two conditions: "with humidity factor" and "without humidity factor." The results indicated an average temperature difference of approximately 3.4 degrees between the two states (Carreto-Hernandez et al., 2024). The temperature difference observed in the current study, approximately 3 degrees Celsius for the cellar with and without a water source, closely aligns with the findings of Carreto-Hernandez et al., thereby confirming the accuracy of the present study's data. Furthermore, to ensure more precise results and validate the software settings, a comparison was made between the simulation data and the experimental results reported by Carreto-Hernandez et al. (2024). This comparison revealed an average error of 9% between the experimental data and CFD results in both scenarios—presence and absence of a water source—affirming the reliability of the software results in this research.



Research conceptual model

Results

The data presented in Table 4 illustrates the average temperature and relative humidity of the "cellar" and "yard" across all four specified conditions, as depicted in Figures 6 and 7. It is noteworthy that in Type 4 (without a pond), both spaces reflect the same annual average relative humidity. This is due to the absence of a moisture source (in this case, a water pond), which the software does not include in its calculations. Based on the comparative analysis of the average temperature and relative humidity data, the following insights can be drawn: - Regarding average temperature, as shown in Figure 8, the most favorable temperature conditions were observed in Type 1 (presence of a pond in both spaces). Here, the average temperature recorded for the yard was 31.38 degrees Celsius, while that of the cellar was 24.79 degrees Celsius. - The numerical results presented in Table 5 indicate that in Type 3 (pond only in the yard), there is minimal variation in the temperature changes of the cellar. This situation arises despite the influence of airflow, albeit very slight, which is noted in all four conditions in both the yard and cellar as per the Velocity Magnitude section of Table 5. Consequently, there are no significant effects on temperature reduction. Furthermore, when the pond is solely in the basement, the temperature difference compared to the scenarios with two ponds remains slight (less than 2 degrees Celsius).

Conclusions

This research, conducted as a simulation study, utilized quantitative data for description and interpretation to investigate the impact of a water source in desert homes. Specifically, the study examined the role of moisture as a type of disturbed particle in a two-phase, unstable flow involving air and water particles, focusing on its efficacy in lowering temperature and enhancing thermal comfort. This process was assessed through the analysis of particle flow behavior and the tracking of its changes over time. The key findings can be summarized as follows: - The pool serves as a humidity source, aiding in temperature reduction through increased relative humidity. Its primary role, however, lies in fostering thermal comfort by alleviating the adverse effects of dry air through the interaction of humidity and airflow within the cellar and yard. - Airflow movement from the windward side, facilitated by chimney conditions and suction modes, leads to the formation of micro-tornadoes in enclosed spaces, contributing to cooling. When these micro-vortices interact with moisture droplets in the dry air of hot regions, they further lower temperature and enhance thermal comfort. Notably, this temperature reduction is more pronounced in areas surrounding the moisture source (water pool). - Compared to other studies in this domain, it appears that there has been no direct research focusing on these specific variables. However, various investigations have explored the thermal effects of water or humidity in reducing ambient temperature through water spraying systems across diverse applications, including educational, greenhouse, and residential settings (Gorji Mahlabani et al., 2022; Ghoulem et al., 2020; M. Kassir, 2016). This underscores that utilizing any moisture source in hot and dry environments not only improves thermal comfort and achieves desired temperatures but also significantly enhances the functional efficiency of the environment.

بررسی تغییرات رفتار حرارتی فضا با در نظر گرفتن نقش «آب» در سطح زیرزمین و حیاط؛ مطالعه موردی: الگوی خانه‌های یزد

مریم کیایی^۱، علی اکبر حیدری^{۲*}، حمید اسکندری^۳

۱. پژوهشگر دورهٔ پسادکترای معماری، گروه معماری، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: maryam_20k@yahoo
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه معماری، دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: aliakbarheidari.iust@gmail.com
۳. استادیار، گروه معماری، دانشکدهٔ فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: eskandari.auy@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: از جمله راهکارهای اقلیمی پایدار به منظور ایجاد آسایش حرارتی و مبارزه با شرایط سخت آب‌وهوایی این منطقه، استفاده از حیاط مرکزی و زیرزمین است. اما به دلیل کمبود رطوبت در هوا، صرفاً ساخت این دو فضا به ایجاد آسایش حرارتی کمک نمی‌کند. لذا فضای حوض در حیاط و در مواردی به سرداب یا همان زیرزمین نیز اضافه می‌شود تا به کاهش دما و رطوبت نسبی کمک کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۳	حضور آب در فضا به چه میزان «بر تغییرات دما و رطوبت نسبی فضای سرداب و حیاط» در خانه‌های مناطق کویری تأثیرگذار بوده است؟
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲	سنجش میزان تأثیر آب در تأمین آسایش حرارتی فضای سرداب و حیاط با در نظر گرفتن متغیر حوض در قلب این دو فضا در قالب یک پژوهش کمی و شبیه‌سازی عددی است.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸	روش پژوهش: از نوع توصیفی و تحلیلی و مطالعات کتابخانه‌ای و اینترنتی است. همچنین از روش شبیه‌سازی به منظور بسط متغیر مدنظر تحقیق (عامل حوض در دو فضای سرداب و حیاط) استفاده شده است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹	یافته‌ها: یافته‌های تحقیق نشان داد که استفاده از منبع رطوبت (حوض)؛ به طور متوسط منجر به کاهش دما تا ۳/۵ درجهٔ سانتیگراد در حیاط و تا ۲/۵ درجهٔ سانتیگراد در سرداب نسبت به حالت بدون حوض در گرم‌ترین روز سال شده است.
کلیدواژه‌ها: رفتار حرارتی، آسایش حرارتی، زیرزمین، حیاط، حوض آب.	نتیجه‌گیری: همچنین نتایج نشان داد وجود حوض در حیاط، تغییرات محسوسی در دما و رطوبت زیرزمین — حتی با وجود گردش هوا — ایجاد نمی‌کند. اما وجود آن برای کاهش دمای حیاط ضروری است، بنابراین نمی‌توان آن را از پیکره‌بندی خانه‌های کویری حذف کرد. اما نقش حوض آب و رطوبت ناشی از آن در ایجاد آسایش حرارتی در سرداب به‌خصوص در ساعات بسیار گرم روز (تفاوت دمای حدود ۹ درجه نسبت به بیرون در سناریوی حوضخانه، در مقایسه با سناریوی بدون حوض که تفاوت دما در حدود ۵ درجه است) انکارناپذیر است.
استناد: کیایی، حیدری و اسکندری (۱۴۰۳). بررسی تغییرات رفتار حرارتی فضا با در نظر گرفتن نقش آب؛ در زیرزمین و حیاط مورد مطالعه (مدل خانه‌های یزد)، مسکن و روستایی.	
ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.	



DOI: <https://doi.org/10.22034/43.186.4>

© نویسندگان.

مقدمه

در قرن حاضر، بحران مصرف انرژی و مشکلات زیست‌محیطی بر بسیاری از فعالیت‌های انسانی تأثیر گذاشته است. این امر سبب شده که طراحی معماری با چالش‌های متعددی برای مقابله با این بحران‌ها مواجه گردد. این مسئله در مناطق گرم‌وخشک به سبب بالابودن دما و کمبود رطوبت، نمود بیشتری دارد. به منظور حل این مشکل، معماری بومی ایران راهکارهایی مبتکرانه را ارائه کرده که به سبب دارابودن تجربیات ارزشمند، در مقابله با شرایط سخت در اقلیم گرم‌وخشک و در زمینه معماری پایدار قرن‌ها استفاده شده است (Yazdi et al., 2019). یکی از راهکارهای خلاقانه به منظور ایجاد آسایش حرارتی در خانه‌های بومی مناطق گرم‌وخشک ایران، استفاده از فضای زیرزمین است که گاهی برای آسایش حرارتی بیشتر، در ترکیب با حوض آب ایجاد شده است. این فضا در معماری سنتی ایران، حوضخانه نام دارد. در کنار حوضخانه به منظور تأمین آسایش حرارتی بیشتر، در فضای حیاط مرکزی نیز «حوض» ایجاد می‌شد که هم بتواند فضای حیاط را خنک کند و هم با حرکت جریان هوا از روی آن به سمت فضای داخل، اتاق‌های اطراف را تهویه کند. از طرفی با ایجاد پنجره در بخش بالای دیوار زیرزمین، حرکت هوا در داخل این بخش نیز انجام می‌شد. از سوی دیگر، ارتباط دوسویه بادگیر با اتاق و زیرزمین منجر به تهویه و ایجاد کوران دوطرفه هوا (هم از طریق پنجره و هم از طریق روزنه بادگیر) می‌شد. چنین حالتی (وجود حوض در زیرزمین و حیاط مرکزی) بهترین حالت به منظور تهویه مطبوع (دما و رطوبت مناسب) است (Saljoughinejad & Rashidi Sharifabad, 2015). از سوی دیگر، «حوض آب» در خانه‌های سنتی عموماً نقشی ثابت دارد. به این معنی که در قلب حیاط و بعضاً در بخش سرداب، یک حوض (با تناسبات گوناگون) وجود داشته است. اما همیشه تأمین این شرایط، به دلیل کمبود آب در این مناطق امکان‌پذیر نبوده است.

مطالعات تجربی متعددی بر روی مسئله چگونگی تأمین آسایش حرارتی در مناطق گرم‌وخشک انجام شده است. این تحقیقات نشان داده که متغیرهای مختلفی بر کیفیت این مسئله در فضای داخلی اثرگذار است. یکی از آن‌ها وجود رطوبت در فضا است. بنابراین وجود یک منبع آب دائمی نظیر حوض در فضا می‌تواند به آسایش حرارتی کمک کند. اما این که در چه حالتی وجود آب، بیشتر اثرگذار است و به چه میزان در ایجاد آسایش حرارتی نقش دارد، نیازمند بررسی است. بر این اساس، پژوهش حاضر به دنبال مقایسه و تحلیل تفاوت «دما» و «رطوبت» در شرایطی است که حوض در حیاط و یا زیرزمین قرار دارد. بر این اساس، نمونه‌های موردی تحقیق از چهار تیپ بنای سنتی متشکل از حیاط مرکزی و سرداب به شرح زیر انتخاب گردید:

تیپ ۱. حالتی که حوض آب هم در حیاط هم در سرداب قرار دارد؛

تیپ ۲. حالتی که حوض آب فقط در سرداب قرار دارد؛

تیپ ۳. حالتی که حوض آب فقط در حیاط قرار دارد؛

تیپ ۴. حالتی که حوض آب در هیچ‌کدام از دو فضای مذکور قرار ندارد.

در حقیقت این تحقیق در پی سنجش میزان تأثیر آب در تأمین آسایش حرارتی در قالب یک پژوهش کمی و شبیه‌سازی است (هدف تحقیق). به این منظور متغیرهای «دما» و «رطوبت نسبی» با استفاده از نرم‌افزار اتودسک سی‌اف‌دی، در هر چهار حالت یادشده شبیه‌سازی خواهد شد. با این توضیحات، پرسش اصلی تحقیق به این شرح قابل طرح است: حضور آب در فضا «چه میزان» بر تغییرات دما و رطوبت نسبی و در نهایت آسایش حرارتی فضای «سرداب» و «حیاط» در خانه‌های مناطق کویری تأثیرگذار است؟

پیشینه پژوهش

تحقیقات متنوعی در خصوص عوامل تأثیرگذار بر ایجاد آسایش حرارتی محیط صورت گرفته است. مثلاً، نتایج تحقیقی نشان داد که با افزایش عرض کانال بادگیر، دبی جرمی دریچه خروجی از بادگیر خطی افزایش می‌یابد. این موضوع با افزایش سرعت باد و جریان بیشتر هوا، به تهویه مطبوع و در نتیجه افزایش آسایش حرارتی کمک می‌کند (Afonso & Oliveira, 2000). عملکرد بادگیر در ترکیب با آب بازدهی بالاتری نیز خواهد داشت. این موضوع در تحقیقی دیگر بررسی شد و در آن به این نکته دست یافت که با توجه با تأثیرات چشمگیر ترکیب بادگیر و حیاط مرکزی در کاهش دما در مقیاس خرد، می‌توان از آن در قالب اثر

دودکش در ساختمان‌های معاصر استفاده کرد (Tolou Behbood et al, 2010). همچنین نتایج تجربی اندازه‌گیری دما در سردترین و گرم‌ترین ماه سال (ژوئن و دسامبر) در مقاله‌ای با استفاده از روش توصیفی و کیفی بررسی شد که نتایج آن نشان داد استفاده از سرداب و حیاط مرکزی (به خصوص به صورت گودال باغچه) به ترتیب بهترین روش برای کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی در فصل گرم در مناطق گرم‌وخشک ایران است و نقش مؤثری در تأمین آسایش محیطی بر عهده دارد (Akhtarkavan & Fallahi, 2020). بررسی دیگری نشان داد که عامل کمبود میزان رطوبت نسبی در منطقه، بیشترین تأثیر را روی نسبت (تناسب و ابعاد) حوض به حیاط خانه‌ها داشته است. به عبارت دیگر، در مناطق خشک، نسبت اندازه حوض به حیاط بیشتر از سایر مناطق آب‌وهوایی است (Soheili & Gol Baten Monfared, 2019). اما به نظر می‌رسد در مورد «میزان» تأثیر آب بر کیفیت آسایش حرارتی به صورت کمی و پارامتریک و با رویکرد شبیه‌سازی در الگوی خانه‌های مناطق گرم‌وخشک، تحقیق مؤثری انجام نشده است. در جدول ۱، پژوهش‌های انجام‌شده درباره موضوع فضای سرداب و تهویه طبیعی در خانه‌های مناطق گرم‌وخشک به اختصار به نمایش درآمده است.

جدول ۱. پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه سرداب (حوضخانه) و تهویه طبیعی در خانه‌های مناطق کوبری

کاربری	نویسنده	چهارچوب	داده‌ها	روش و ابزار تحقیق	آنالیز داده‌ها
سرداب (حوضخانه)	Wen et al., 2023	- دوگانه فضا-جریان هوا - فشار باد - هم‌افزایی فشار حرارتی - هوای تازه - پیش‌تهویه	در چهار مقیاس، فرم فضاها که در تهویه طبیعی تأثیرگذار است، بررسی شده: ۱. مقیاس شهری؛ ۲. مقیاس سایت؛ ۳. مقیاس ساختمان؛ ۴. ترازوی اتاق.	- اندازه‌گیری‌های میدانی - مدل‌های مقیاس‌شده - شبیه‌سازی سی‌اف‌دی	پیشنهادها: - بهینه‌سازی تهویه غیرفعال زیرزمینی توسط ایجاد ریزاقلیم و طراحی سایت؛ - ساخت نمونه‌هایی که زیرزمین از طریق طراحی یک دودکش، با فضای آزاد در ارتباط است؛ - طراحی مسیریایی جهت اتصال جریان‌های هوا در کل ساختمان.
	Fernando, 2009	- رفتار حرارتی	بررسی عمق زیرزمین‌های مختلف به منظور به‌دست‌آوردن بهترین عمق پرورش نوشیدنی (اجزای زیرزمین مدنظر نیست)	- ثبت دما با دماسنج در ماه‌های مختلف سال	- وقتی دمای هوای بیرون بالاتر از دمای هوای داخل باشد، برای انبار مواد غذایی (تخمیری) شرایط مناسب‌تری ایجاد می‌شود. - رفتار حرارتی عالی انبارها در بهار و تابستان در دوره‌ای که دما در آن بالاتر است ایجاد می‌شود. و شرایط دمایی بهینه را برای تهیه و نگهداری فراهم می‌کند.
	Foruzanmehr & Fergus, 2008	- آسایش حرارتی - دمای داخلی - نوع تهویه-عملکرد فعلی	نصب دماسنج در ۱۲ نقطه مختلف خانه و به‌دست‌آوردن دمای آن‌ها (بررسی اجزا)	- پرسشنامه و مصاحبه - گزارش سازمان هواشناسی - ثبت دما با دماسنج	- مقبولیت دمای زیرزمین در تابستان و زمستان با توجه به نوسان دمای پایین؛ - رابطه بین متغیرهای مؤثر بر مقبولیت/کاربرد فناوری‌های معماری سنتی ایران در بستر مدرن و همچنین اثربخشی آن‌ها در کاهش مصرف انرژی و انتشار CO2.
	Sadooghi et al., 2019	- رفتار حرارتی - بهره‌وری انرژی - دمای داخل - دمای خارج	مطالعه بر روی آثار دما با توجه به ویژگی اجزا (مطالعه اجزا)	ثبت دمای بخش‌های مختلف (از جمله زیرزمین) داخل و خارج با دماسنج	- تفاوت محسوس بین دمای هوای داخل و خارج نه تنها به دلیل قرارگرفتن ساختمان‌ها داخل زمین، بلکه نتیجه تهویه غیرفعال است که توسط انبار امکان‌پذیر شده است؛ - پایداری دمای هوای داخل انبارهای زیرزمینی، در طول مدت تحقیق از نتایج تجربی این پژوهش است.
	Izadpanahi et al., 2021	- همرفتی - آسایش حرارتی - تهویه شبانه - تهویه طبیعی - خنک‌کننده - تبخیری	بررسی کلی بخش سرداب و تغییرات دمایی آن	دمای سالانه دماسنج	- دمای ثابت سالانه این فضاهای زیرزمینی به خنک‌تر بودن آن‌ها نسبت به حیاط و فضاهای روی زمین کمک می‌کند و بنابراین، در روزهای گرم تابستان، واحه‌های دلپذیر از نظر حرارتی برای ساکنان فراهم می‌کند.

1. Preconditioning

	Foruzanmehr & Vellinga, 2011	- آسایش حرارتی - میانگین دمای داخل - درجه حرارت - رطوبت - تهویه طبیعی	بررسی کلی بخش سرداب و تغییرات دمایی آن	- پرسشنامه‌ها، - مصاحبه و مشاهده - دماسنج	- میانگین دما در زیرزمین‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از میانگین دمای بیرون بود؛ - تنوع دما در خانه‌های بومی به این ترتیب امکان سازگاری را در اختیار ساکنان قرار می‌دهد؛ - نتایج پرسشنامه نشان داد مردم به توانایی بالقوه زیرزمین در سرمایه‌های غیرفعال آگاهند، ولی استفاده از آن را مستلزم به‌روزرسانی می‌دانند.
	Khalili & Amindeldar, 2014	- بهره‌وری انرژی - سازگاری رفتار - حرارتی	بررسی کلی بخش سرداب و تغییرات دمایی آن	- دمای سالانه - دماسنج (برگرفته از تحقیقات قبل) - جدول مقایسه‌ای	- کاهش استفاده از زیرزمین و گرایش به حذف استفاده از انرژی‌های گرمایشی و سرمایه‌های غیرفعال در خانه‌های مدرن قابل مشاهده است.
	Saljoughinejad & Rashidi Sharifabad, 2015	- دمای هوا - دمای هوای محبوس در زیرزمین - تهویه طبیعی	بررسی کلی بخش سرداب و تغییرات دمایی آن	- جدول مقایسه‌ای	استراتژی‌های آب‌وهوایی به طور مشابه در سه دما استفاده می‌شود. - سطوح؛ - سقف و سطح سقف؛ - فاصله بین سقف و کف؛ - سطح زمین و زیرزمین.
	Passe & Battaglia., 2015	- تهویه طبیعی - تفاوت دما (همرفت) - فشار - جهت و سرعت باد - آسایش حرارتی - رطوبت - توزیع دما و سرعت هوا	مطالعه بر روی اجزای فضا از جمله زیرزمین	- سی‌اف‌دی - نرم‌افزار انرژی پلاس - دمای سالانه - دماسنج	- نرخ تبادل هوا برای اهداف آسایش، انرژی و کیفیت هوای داخلی تابعی از هندسه، مقیاس و اندازه روزنه‌هاست. دهانه‌های کوچک‌تر باعث افزایش و دهانه‌های بزرگ باعث کاهش سرعت هوا می‌شود. مفروضات اساسی بر اساس قانون بقای جرم است؛ آنچه از یک طرف وارد می‌شود باید از طرف دیگر خارج شود. اما دانستن آنچه بین ورودی و خروجی می‌گذرد مهم است.
	Soltanzadeh & Bideli, 2015	- تهویه هوا - تأثیر هوا - خنک‌کننده - تبخیر	- ابعاد زیرزمین - عمق (سرداب) - ارتفاع (سرداب)	- دماسنج حرارتی - دماسنج دیجیتال - توصیفی	- عوامل متعددی از جمله عمق، ارتفاع و ابعاد سرداب در کاهش میزان مصرف انرژی تأثیر داشته و میزان تأثیر آن‌ها متفاوت بوده است.

مبانی نظری

همان‌گونه که اشاره شد به منظور سنجش نقش آب در بهبود آسایش حرارتی در مناطق گرم‌وخشک، باید فرایند شبیه‌سازی در یک نمونه موردی به آزمون گذاشته شود. با در نظر گرفتن این شرایط و با مطالعه خانه‌های منطقه گرم‌وخشک ایران، ابتدا به صورت خلاصه محدوده مورد مطالعه تشریح می‌شود. سپس با توجه به نوع ارتباط میان فضای زیرزمین و حیاط، الگوی مدنظر تحقیق انتخاب و در ادامه بر اساس آن شبیه‌سازی و تحلیل خواهد شد.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش در منطقه گرم‌وخشک ایران قرار دارد. شهر یزد که در فلات مرکزی ایران واقع شده دارای آب‌وهوایی گرم‌وخشک است (Keshtkaran, 2011). همان‌گونه که از تصاویر هوایی شهر یزد پیداست، بافت شهر فشرده است و با خانه‌های حیاط مرکزی پوشیده شده است. به دلیل وجود شرایط سخت آب‌وهوایی، تمهیدات معماری در خانه‌های این اقلیم جالب توجه است (Azizi-Bondarabadi & Haji Sadeghi, 2022). این تمهیدات شامل تعیین عناصری در بخش‌های مختلف خانه است. هر یک از این عناصر به نحوی به آسایش حرارتی کمک می‌کنند. در حقیقت این عناصر هر کدام با گونه‌هایی از سیستم‌های تهویه و سرمایه‌های غیرفعال کار می‌کنند و اختلاف دمایی قابل توجهی را در طول شبانه‌روز در فضاهای داخلی به نسبت فضاهای خارجی ایجاد می‌کنند (شکل ۱).



شکل ۱. تصاویر هوایی شهر یزد (Saljoughinejad & Rashidi Sharifabad, 2015)

شناخت و معرفی داده‌های آب‌وهوایی سالانه شهر یزد

همان‌گونه که یاد شد، به منظور بررسی نقش آب در خانه‌های اقلیم گرم‌وخشک، پس از بررسی خانه‌های سنتی مختلف در شهرهای فلات گرم‌وخشک ایران، شهر یزد انتخاب شد. بنابراین به منظور اثبات دقیق بودن شرایط شبیه‌سازی در نرم‌افزار در ابتدا ضروری است که مختصری به شرایط دمایی و آب‌وهوایی شهر یزد پرداخته شود. سپس بر اساس این داده‌ها و نتایج آن، در نرم‌افزار شبیه‌سازی خواهد شد.

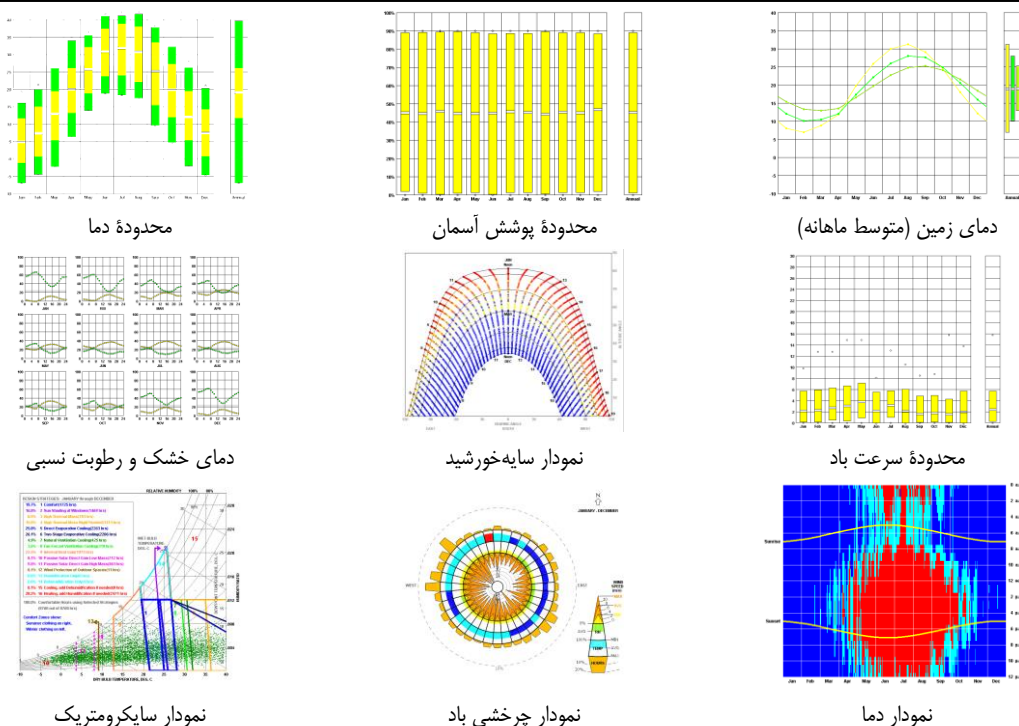
شهر یزد تابستان‌های بسیار گرمی را تجربه می‌کند و اختلاف دما بین شب و روز آن بسیار زیاد است. بر پایه داده‌های ایستگاه سینوپتیک، این شهر در طبقه‌بندی کوپن جزو منطقه بیابانی به شمار می‌رود. جدول ۲، داده‌های مربوط به معدل درجه حرارت هوا و معدل رطوبت نسبی آن را نشان می‌دهد. طی یک دوره آماری پنجاه‌وسه‌ساله (۱۹۵۱-۲۰۰۳) میانگین دمای کمینه ۳/۸ درجه سانتیگراد در ژانویه و بیشینه ۴۱/۲ درجه سانتیگراد در ژوئیه متغیر است. همچنین کمینه مطلق دما ۱۶ درجه سانتیگراد در ژانویه و بیشینه مطلق دما، ۴۵/۶ درجه سانتیگراد در ژوئیه ثبت شده است (country's meteorological organization). مطابق داده‌های شکل ۲، در کل رطوبت نسبی هوای شهر یزد در طول سال پایین است. پایین بودن رطوبت نسبی هوا به دلیل بالابودن دمای هوا و فقدان منبع تأمین رطوبتی است. کاهش میزان رطوبت نسبی هوا موجب تشدید نوسان‌های شبانه‌روزی دمای هوا می‌شود، به طوری که در مقابل هوای بسیار گرم روزانه، هوای مطلوب و خنکی در هنگام شب تجربه می‌شود. میزان رطوبت نسبی در طول سال نیز بین کمینه و بیشینه ۱۳/۷۵-۵۲ متغیر است.

جدول ۲. معدل درجه حرارت و رطوبت نسبی شهر یزد (کسماپی، ۱۳۸۲، ۲۹۴)

ماه‌های سال	معدل درجه حرارت هوا °C			معدل رطوبت نسبی %		
	متوسط حداکثر	متوسط حداقل	متوسط ماهانه	ساعت ۶:۳۰	ساعت ۱۲:۳۰	متوسط روزانه
Jan	۱۱/۹	-۰/۹	۳/۸	۶۶	۳۸	۵۲
Feb	۱۵/۳	۱/۸	۶/۷	۵۹	۳۰	۴۴/۵
Mar	۲۰/۴	۶/۶	۱۳/۳	۴۹	۳۲	۳۵/۵
Apr	۲۵/۷	۱۱/۷	۱۹/۲	۴۷	۲۳	۳۵
May	۳۱/۹	۱۷	۲۵/۳	۳۲	۱۶/۵	۲۴/۲۵
Jun	۳۷/۴	۲۱/۸	۳۱	۲۱	۱۱/۵	۱۶/۲۵
Jul	۴۵/۳	۳۷/۲	۴۱/۲	۱۷	۱۰/۵	۱۳/۷۵
Aug	۳۷/۶	۲۱/۴	۳۲	۲۰	۱۰	۱۵
Sep	۳۳/۹	۱۶/۹	۲۷/۱	۲۴	۱۰/۵	۱۷/۲۵
Oct	۲۷/۳	۱۰/۳	۲۰/۶	۳۴	۱۶	۲۵
Nov	۱۹/۳	۴	۱۲/۷	۵۳	۲۵	۳۹
Dec	۱۳/۵	-۰/۳	۶/۲	۶۱	۳۲	۴۶/۵

در شکل ۲، داده‌های آب‌وهوایی شهر یزد با مراجعه به سایت ای‌پی‌دبلیو و استخراج اطلاعات آماری مربوط به استاندارد آس‌ری^۴ و با استفاده از نرم‌افزار کانسولنتت کلایمیت به نمایش درآمده است.

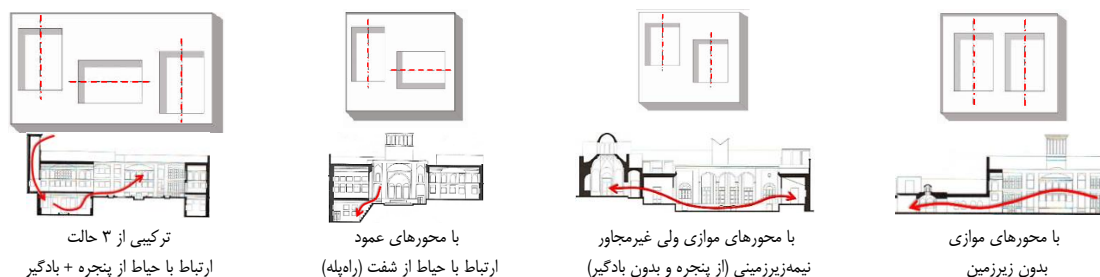
4. ASHRE Standard 55-2004 using PMV



شکل ۲. بررسی استاندارد آب‌وهوایی شهر یزد با استفاده از اطلاعات سایت EPW^۵ و نرم‌افزار Climate Consultant

الگوی خانه‌های یزد

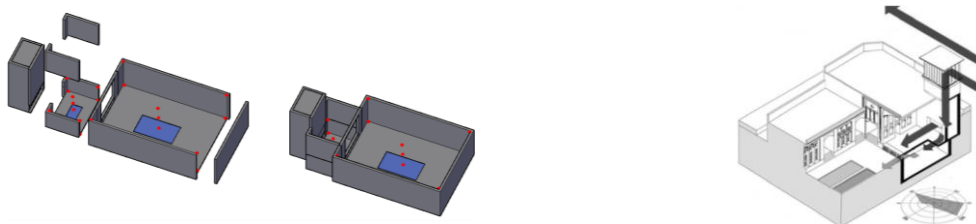
در کل بافت سنتی شهر یزد دارای خانه‌هایی با حیاط‌های مرکزی است. اکثر خانه‌های این شهر دارای یک یا چند حیاطند که در موقعیت‌های مختلف نسبت به هم قرار گرفته‌اند. در تعداد اندکی از خانه‌ها تمام یا بیشتر بخش‌های خانه «روی زمین» قرار گرفته است. اما به دلیل مساعد بودن شرایط زیست در بخش زیرین زمین، اکثر خانه‌های این شهر دارای زیرزمین بوده و برخی نیز حالت نیمه‌زیرزمینی دارند. برخی از زیرزمین‌ها فقط از راه پله به فضای حیاط دسترسی دارند و برخی با استفاده از پنجره، نور و هوای مستقیم دریافت می‌کنند و با حیاط در ارتباطند. همچنین برخی از زیرزمین‌ها با بادگیر دارای ارتباط مستقیمند و برخی دیگر ارتباطی ندارند. اما کامل‌ترین نوع ارتباط میان این عناصر به منظور تهویه مناسب، گونه‌ای است که جریان هوا از یک سمت وارد (از سمت بادگیر) و از سمت دیگر (از سمت حیاط) خارج شود (Mahmoudi Zarandi, 2009). این گونه مطالعاتی در پژوهش حاضر بررسی شد (شکل ۳).



شکل ۳. الگوی خانه‌های چندحیاطه و ارتباط میان زمین و ساختمان در شهر یزد (detailed urban planning of Yazd city)

در نمونه مورد بررسی در این پژوهش، ورود هوا از بادگیر آغاز و با گردش در زیرزمین ادامه پیدا می‌کند. در نهایت هوا از طریق پنجره رو به حیاط خارج می‌شود (شکل ۴).

5. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html#IDYA_Yazd

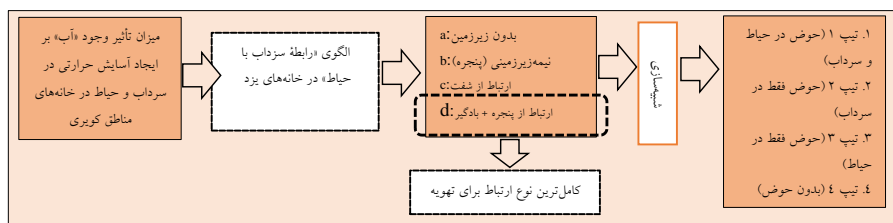


شکل ۴. الگوی سه بعدی رابطه میان حیاط، زیرزمین و بادگیر (www.cyberarchi.com)

شکل ۵. الگوی شبیه سازی شده و نقاطی که در فضا اندازه دما و رطوبت آن ها به منظور بررسی و مقایسه ثبت شدند

روش تحقیق

همان طور که گفته شد، به منظور پی بردن به پاسخ سؤال تحقیق، این پژوهش از شبیه سازی عددی استفاده می کند. این شبیه سازی در یک خانه خواهد شد که یک نمونه فرضی با توجه به الگوی تشریح شده از خانه های شهر یزد در بخش قبل است. در این روش، متغیرهای وابسته ثابتی اندازه گیری خواهند شد. این متغیرها شامل «دما» و «رطوبت نسبی» هستند که در فضاهای زیرزمین و حیاط اندازه گیری خواهد شد. به منظور برداشت میانگین دمای فضاهای یادشده، نقاطی انتخاب شد که در شکل ۵ با رنگ قرمز نشان داده شده است این نقاط به صورت مورب به یکدیگر متصل شدند. هر خط شامل ۱۰۰ نقطه است. همچنین موقعیت خطوط به گونه ای انتخاب گردید که به طور نسبی بیشتر نقاطی را که به واسطه وجود حوض امکان تغییر دما و رطوبت را داشت، در بر بگیرد. دمای میانگین هر خط ثبت گردید. این اعداد که مربوط به رطوبت نسبی و دمای نقاط یادشده است، در شکل ۱۰ به نمایش درآمده است. برای تحلیل به روش شبیه سازی از نرم افزار سنجش شرایط دمایی در محیط بسته (اتودسک سی اف دی) کمک گرفته شد. در واقع، رفتار حرارتی سیال های مدنظر در یک نمونه شبیه سازی شده را می توان از طریق یک رویکرد مدل سازی CFD تحلیل کرد. این روش به درک رفتار غیرفعال عناصر ساختمان و تسهیل در تصمیم گیری برای طراحی سیستم های تهویه و مدیریت انرژی بهینه در فضاهای زیرزمینی کمک می کند (Porras-Amores et al., 2019). در نهایت نتایج عددی به دست آمده در حالت ها مختلف قرارگیری حوض در فضاها شامل هم در حیاط هم در سرداب (تیپ ۱)؛ فقط در سرداب (تیپ ۲)؛ فقط در حیاط (تیپ ۳)؛ در هیچ کدام (تیپ ۴) با یکدیگر مقایسه شد تا تأثیر متغیر آب در کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی و بهبود رفتار حرارتی فضا در شرایط یادشده مشخص شود. از سوی دیگر، به منظور سنجش دقیق تر داده های دمایی و افزایش اعتبار نتایج، با توجه به داده های مستخرج از شکل ۲ و بررسی دمای خشک در ساعات های مختلف، این اعداد به نرم افزار داده شد. نتایج در ۱۲ ساعت مختلف در گرم ترین روز سال با توجه به متوسط دمای ثبت شده انجام شد که نتایج آن در شکل های ۱۴ و ۱۵ ثبت شد. در نهایت مقایسه هایی از طریق توصیف یافته های عددی و شکلی مستخرج از نرم افزار اتودسک سی اف دی انجام شد. در این پژوهش، روش تحقیق از نوع توصیفی و تحلیلی است. نمودار زیر (شکل ۶) فرایند تحقیق را به اختصار نمایش می دهد.



شکل ۶. مدل مفهومی تحقیق

شرایط مرزی^۶ و مش بندی^۷ (اطلاعات داده شده به نرم افزار)

شرایط مرزی در تنظیمات نرم افزار با توجه به ویژگی های خاص فضاهای مدنظر پژوهش یعنی زیرزمین و حیاط تعریف شد. در این خصوص سه پارامتر سرعت، دما و اسکالار بر اساس داده های آب و هوایی شهر یزد در زمان شبیه سازی (گرم ترین روز سال)

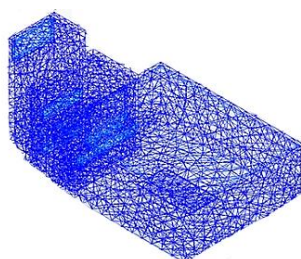
6. Boundary conditions

7. Mesh design

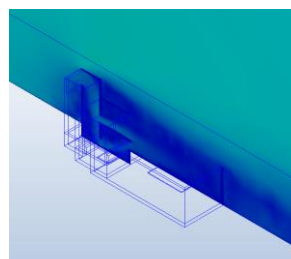
در نرم‌افزار تعریف گردید که دمای ۴۱/۲ درجه سانتیگراد در بخش تنظیمات دما، سرعت ۱ متر بر ثانیه در بخش تنظیمات سرعت هوا و مقدار ۰/۰۱ پارامتر اسکالر در نرم‌افزار وارد شد. همچنین در بخش معادلات «ضریب انتشار برای داده‌های عددی»^۸، عدد Diffusion Coefficient برای آب ۲،۲۹۹ ای-۹ m²/s و برای بخار آب نیز ۱۲،۴۲ ای-۵ m²/s تعیین شد (Kaya & Aydın, 2007; Van Belleghem, 2010). (شکل ۷). از سوی دیگر، به منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین خطاهای گسسته‌سازی^۹ از تحلیل حساسیت شبکه^{۱۰} استفاده شد. آنالیز مربوطه بر روی نمونه‌های مدنظر تحقیق انجام گرفت که نتیجه آن تشکیل گرید^{۱۱} بود (شکل ۸). مطابق پژوهش‌های انجام‌شده، عدد diffusion coefficient برای بخار آب از معادله^۱ زیر (معادله ۱) تعیین می‌شود:

$$\frac{dw}{dt} = -\nabla \cdot \vec{g} \Leftrightarrow \frac{\partial w}{\partial RH} \frac{\partial RH}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial RH} \frac{\partial RH}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\rho_{\text{air}} \frac{D}{\mu} \nabla(Y) \right)$$

معادله (۱)



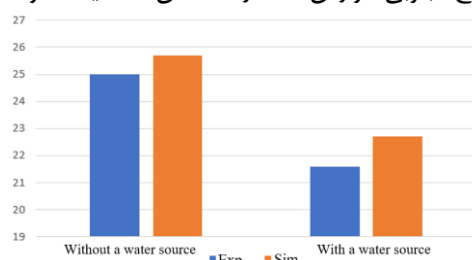
شکل ۸. شبکه‌های محاسباتی برای تحلیل حساسیت شبکه



شکل ۷. نمایش خروجی نرم‌افزار CFD

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نرم‌افزار، نتایج شبیه‌سازی CFD با نتایج آزمایش تجربی صورت‌گرفته در پژوهش (Carreto-Hernandez et al., 2024) مقایسه شد. در آن پژوهش دمای هوا و رطوبت نسبی در یک اتاق مجهز به بادگیر در دو حالت «با وجود عامل رطوبت» و «عدم وجود عامل رطوبت» ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از وجود تفاوت دمای میانگین در حدود ۳/۴ درجه در دو حالت مذکور بود (Carreto-Hernandez et al., 2024). اختلاف دمای به‌دست‌آمده در پژوهش (Carreto-Hernandez et al., 2024) در دو حالت وجود و عدم وجود منبع آب در فضا (در حدود ۳/۴ درجه) با اختلاف دمای به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر برای سرداب در حالتی که منبع آب موجود و یا حذف شده باشد (در حدود ۳ درجه سانتیگراد) مشابه است که این موضوع تأییدی بر صحت داده‌های به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر است. در عین حال، به منظور بررسی و تعیین دقیق‌تر نتایج و نیز تأیید تنظیمات در نظر گرفته‌شده برای نرم‌افزار، نگارندگان نمونه بررسی‌شده در پژوهش (Carreto-Hernandez et al., 2024) را شبیه‌سازی و نتایج آن را با نتایج تجربی گزارش‌شده در مقاله آن‌ها مقایسه کردند (شکل ۹).



شکل ۹. بررسی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

۸. برای آنالیز داده‌های (نقاط) تعیین‌شده در فضا با توجه به ضرورت سنجش تأثیر آب باید diffusion coefficient را از طریق معادله‌ای تعیین کرد. با استفاده از مدل‌های عددی موجود می‌توان انتقال همزمان گرما و رطوبت را به دست آورد (Chandramohan, 2016). برخی از این مدل‌سازی‌ها با فرض ساده‌بودن مدل یعنی یک‌بعدی و دوبعدی و با ضرایب انتقال سطح ثابت (هم گرما و هم جرم) هستند (Oztop & Akpinar, 2008; Simal & et al, 1998; Hussain & Dincer, 2003).

9. The computational time and discretization errors

10. Grid-sensitivity analysis

11. Coarse grid

نتایج به دست آمده از مقایسه داده‌های تجربی و نتایج CFD در دو حالت با و بدون منبع آب در فضا حاکی از میانگین خطای ۹ درصدی بود که این موضوع صحت نتایج نرم‌افزاری در پژوهش حاضر را تأیید می‌کند.

یافته‌های پژوهش

نمونه مورد بررسی در این پژوهش به گونه‌ای انتخاب شده است که سرداب علاوه بر ارتباط با حیاط از طریق پنجره، از مسیر بادگیر نیز با فضای بیرون در ارتباط باشد.

با توجه به آنچه پیش‌تر عنوان شد، در این پژوهش بسته به وجود یا عدم وجود حوض آب در محیط سرداب و حیاط، چهار تیپ در نظر گرفته شد که پس از ورود آن‌ها در محیط نرم‌افزار و انجام شبیه‌سازی، مقادیر دما و رطوبت نسبی در هر کدام از فضاهای سرداب و حیاط استخراج گردید (شکل ۱۰). همچنین کانتورها (نمایش شکلی) مستخرج از نرم‌افزار برای دما و رطوبت نسبی در مورد هر چهار حالت یادشده نیز در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

موقعیت خطوط	تیپ ۱		تیپ ۲		تیپ ۳		تیپ ۴	
	Temperature (Celsius)	relative humidity	Temperature (Celsius)	relative humidity	Temperature (Celsius)	relative humidity	Temperature (Celsius)	relative humidity
درون سرداب (Indoor)	16.81	19	17.28	19	29.12	18	27.85	0
	27.82	30	29.47	30	26.83	21	26.57	0
	26.22	39	27.40	37	26.65	22	25.86	0
	26.56	38	27.23	38	26.89	16	25.91	0
	25.41	38	26.69	36	26.28	16	26.67	0
	24.67	32	25.53	33	27.00	18	26.40	0
	26.07	38	27.15	36	26.27	17	25.68	0
میانگین	24.79	33.4	25.82	32.8	27	18.28	26.42	0
	22.58	33	28.43	21	24.82	33	29.50	0
داخل حیاط (Outdoor)	28.40	33	31.83	20	31.12	31	33.62	0
	32.95	35	33.25	25	34.37	35	35.63	0
	33.74	36	32.49	24	34.80	34	34.91	0
	33.95	40	33.47	17	34.73	32	36.29	0
	33.81	28	32.67	15	35.319	38	35.38	0
	34.26	29	33.55	12	35.56	39	35.83	0
	میانگین	31.38	33.4	32.24	24.2	32.95	34.6	34.45

شکل ۱۰. خروجی عددی نرم‌افزار سی‌اف‌دی (شبیه‌سازی) برای حالت‌های مختلف قرارگیری حوض در فضا

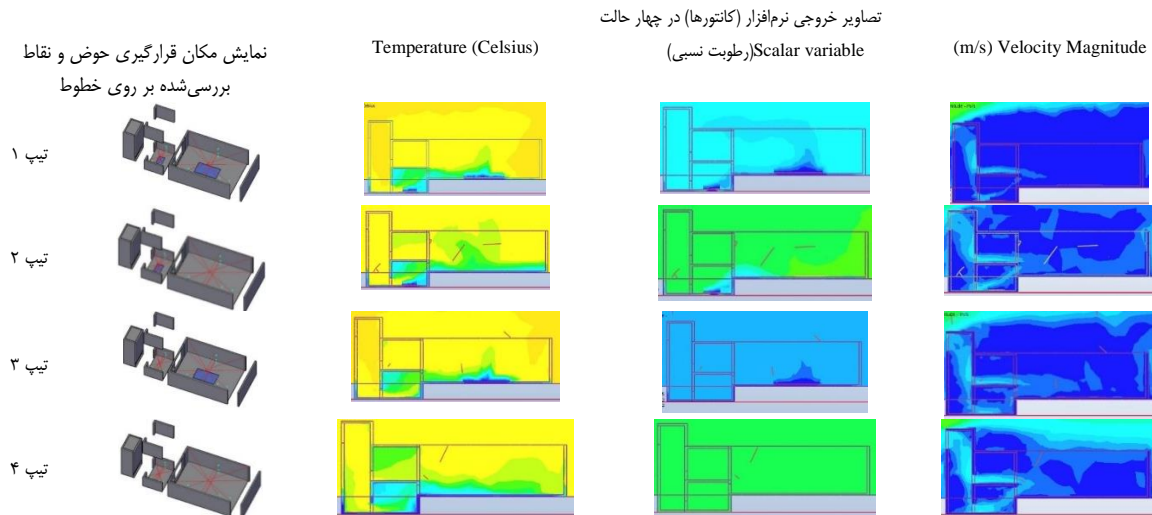
بر مبنای اعداد به دست آمده که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میانگین دما و رطوبت نسبی «سرداب» و «حیاط» برای هر چهار حالت یادشده نیز در نمودارهای شکل‌های ۹ و ۱۰ به نمایش درآمده است. ذکر این نکته ضروری است که برای میانگین رطوبت نسبی در هر دو فضا در حالت تیپ ۴ (بدون حوض) همان میانگین سالانه رطوبت نسبی لحاظ شده است، زیرا بدون وجود منبع رطوبت (در این مثال حوض آب) نرم‌افزار آن را در محاسبات لحاظ نمی‌کند. از مقایسه اعداد به دست آمده از میانگین دما و رطوبت نسبی تحلیل‌هایی برگرفته شد که به شرح زیر ارائه می‌شود:

- درباره میانگین دما، همان‌گونه که در شکل ۸ پیداست، هم در سرداب و هم حیاط، بهترین شرایط دمایی در تیپ ۱ (وجود حوض در هر دو فضا) مشاهده شده است. در این حالت میانگین دمای حیاط ۳۱/۳۸ و میانگین سرداب ۲۴/۷۹ درجه سانتیگراد است.

- با مقایسه میانگین دمای گرم‌ترین ماه سال یعنی ۴۱/۲ درجه سانتیگراد، اختلاف دمایی در حدود ۱۱ درجه با حیاط و ۱۶/۵ درجه با فضای سرداب مشاهده شده است. چنین شرایطی نشان از اختلاف دمای قابل توجه با دمای بیرون از خانه و ایجاد آسایش حرارتی نسبی در درون فضای سرداب و سپس حیاط دارد. این در حالی است که در تیپ ۴ (بدون حوض) در هر دو فضا، شاهد افزایش میانگین دما به خصوص در حیاط هستیم. این افزایش در حدود ۳ درجه در حیاط و ۲ درجه در سرداب است. ذکر این نکته نیز ضروری است که پایین آمدن دمای هوای خشک به تنهایی به آسایش حرارتی کمک نمی‌کند. در حقیقت پایین آمدن دما با افزایش رطوبت نسبی به ایجاد آسایش حرارتی کمک می‌کند که با توجه به خشکی هوا در مناطق کویری، فقط با ایجاد یک منبع ایجاد رطوبت (حوض) امکان‌پذیر است.

- نتایج عددی شکل ۱۱ نشان می‌دهد در تیپ ۳ (حوض فقط در حیاط) تفاوت چندانی در تغییرات دمای سرداب به وجود نیامده است. این مسئله در شرایطی اتفاق می‌افتد که با وجود تأثیر فاکتور جریان هوا (هرچند بسیار اندک) - که مطابق

کانتورهای بخش Velocity Magnitude شکل ۱۱ در هر چهار حالت در فضای حیاط و سرداب جریان دارد - اما همچنان اثرات محسوسی در کاهش تغییرات دما وجود ندارد. همچنین در شرایطی که حوض فقط در سرداب باشد نیز تفاوت دمای اندکی (در حد کمتر از ۲ درجه) با حالت دو حوض دارد.



شکل ۱۱. نمایش شکلی یافته‌های نرم‌افزار و همچنین نمایش موقعیت حوض در سرداب و حیاط و نقاط (خطوط بین نقاط) مدنظر در هر چهار حالت مدنظر پژوهش

- نقش حوض در ایجاد رطوبت در محیط جایگاه ویژه‌ای دارد. همان‌گونه که از یافته‌های شکل ۱۰ و همچنین نمودارهای شکل ۸ پیداست، تفاوتی محسوس در ایجاد رطوبت نسبی محیط، زمانی که حوض در فضا (تیپ ۱ تا ۳) وجود دارد و زمانی که هیچ منبع رطوبتی وجود ندارد، مشاهده شده است. در حقیقت نقش حوض در تغییراتی که در محیط ایجاد کرده، در بخش افزایش رطوبت نسبی به نسبت کاهش دمای محیط پررنگ‌تر به نظر می‌رسد. وقتی میانگین رطوبت نسبی ماهانه در گرم‌ترین روز سال عدد ۱۳/۷۵ را به خود می‌بیند، در موقعیت وجود حوض در هر دو فضا، این عدد به ۳۳/۴ در حیاط و سرداب می‌رسد که اختلافی در حدود ۱۹/۵ را به خود می‌بیند. این تفاوت نسبتاً محسوس حتی زمانی که حوض فقط در یکی از دو فضا مثلاً حیاط وجود دارد نیز بر افزایش رطوبت نسبی فضای دیگر (سرداب) اثرگذار است و اختلاف حدود پنج‌واحدی نسبت به میانگین رطوبت نسبی ماهانه را به وجود می‌آورد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳).



شکل ۱۲. میانگین «دما»ی سرداب و حیاط برای هر چهار حالت یادشده در پژوهش



شکل ۱۳. میانگین رطوبت نسبی حیاط و سرداب برای هر چهار حالت یادشده در پژوهش

البته در این جا ذکر این نکته ضروری است که وجود فضای داخل خاک (زمین) خود موجب افزایش نسبی رطوبت می شود و در شرایطی که آب نیز در آن جا وجود داشته باشد، بر افزایش بیشتر رطوبت نسبی و ایجاد آسایش حرارتی مؤثر است.

آنالیز ساعتی تغییرات دمایی

همان گونه که یاد شد تغییرات دمایی برای دو تیپ از مدل های در نظر گرفته شده در پژوهش در ۱۲ ساعت مختلف با توجه به دمای محیط در گرم ترین روز سال انجام شد. به این معنی که با توجه به دمای هوای ساعت که از داده های دمای هوای ساعتی در شکل ۲ استخراج گردید (نمودار دما)، از ساعت ۹ صبح تا ۸ شب هر یک ساعت، دمای هوا به نرم افزار داده شد تا تغییرات دمای هوا با توجه به شرایط تعریف شده در هر دو تیپ ثبت و در ادامه تحلیل و بررسی شود. ذکر این نکته نیز ضروری است که به منظور ارزیابی هر چه دقیق تر میانگین دمای محیط برای هر فضا، مطابق نمونه های قبل، ابتدا خطوطی (هر خط شامل ۱۰۰ نقطه دما) در بخش های مختلف هر فضا (حوضخانه و حیاط) در نظر گرفته شد و دمای آن ها نیز جداگانه ثبت گردید. در انتها نیز میانگین کل نقاط به منظور ثبت متوسط دمای محیط در ساعت مربوطه، در شکل ۱۴ و ۱۵ یادداشت شد. با توجه به بررسی دمای محیط، بین ساعت های ۱۳-۱۶، گرم ترین دمای ثبت شده در طی روز است. متوسط دمای محیط با توجه به اطلاعات ثبت شده در سایت epw و همچنین شکل ۲، عددی بین ۴۰-۴۳ درجه را در این ساعت ها نشان می دهد. اما در همین ساعت ها حتی در تیپ ۴ که هیچ منبع رطوبتی مستقیم در فضا در نظر گرفته نشده است؛

معدل "درجه حرارت هوا °C" تیپ ۱												نقاط	
۲۰	۱۹،۰۰	۱۸،۰۰	۱۷،۰۰	۱۶،۰۰	۱۵،۰۰	۱۴،۰۰	۱۳،۰۰	۱۲،۰۰	۱۱،۰۰	۱۰،۰۰	۹،۰۰		
۲۷،۶	۲۸،۶	۳۰،۷	۳۰،۶	۳۱،۱	۳۰،۴	۳۳،۸	۳۱،۰۵	۲۹،۵۰	۲۷،۶۰	۲۶،۵۰	۲۵،۵۰	متوسط نقاط حوض	حیاط open space
۳۳،۴	۳۵،۲	۳۷،۸	۳۸،۵	۳۸،۲	۳۸،۸۰	۳۵،۵	۳۵،۱	۳۲،۹	۳۳،۱	۳۵،۵	۳۲،۴۰	متوسط نقاط بالای دیوارها	
۲۷،۳	۲۸،۸	۳۰،۲	۳۱،۰۱	۳۰،۲	۲۹،۴۵	۳۱،۲	۲۹،۶	۲۹،۲	۲۷،۹	۲۷،۸۵	۲۶،۲	متوسط نقاط کف دیوارها	
۲۹،۴۳	۳۰،۸۶	۳۲،۹	۳۳،۳۷	۳۳،۱۶	۳۳،۸۸	۳۳،۵	۳۱،۹۱	۳۰،۵۳	۲۹،۵۳	۲۸،۹۵	۲۸،۰۳	میانگین کل	
۱۸،۳	۱۹،۸۰	۲۰،۲۰	۲۱،۲۰	۲۱،۳۰	۲۲،۵	۲۰،۵	۲۱،۲	۲۰،۵	۲۰،۲	۱۹،۹۰	۱۹،۲۰	متوسط نقاط حوض	سرداب close space
۲۳،۷	۲۳،۶۰	۲۵،۰	۲۶،۳۰	۲۷،۶	۲۷،۷۰	۲۵،۰	۲۶،۲	۲۵،۹	۲۵،۳	۲۳،۹	۲۴،۲	متوسط نقاط بالای دیوارها	
۲۱،۱	۲۱،۵	۲۲،۶	۲۲،۸	۲۳،۷	۲۳،۵	۲۱	۲۳،۳۰	۲۳،۰	۲۲،۳۰	۲۱،۴۰	۲۱،۲۰	متوسط نقاط کف دیوارها	
۲۱،۰۳	۲۱،۶۳	۲۲،۶	۲۳،۴۳	۲۴،۲	۲۴،۵۶	۲۲،۴۳	۲۳،۵۳	۲۳،۱۳	۲۲،۶	۲۲،۰۶	۲۱،۵۳	میانگین کل	

شکل ۱۴. تغییرات دمایی در ۱۲ ساعت مختلف در نقاط مختلف تعیین شده در تیپ ۱ پژوهش

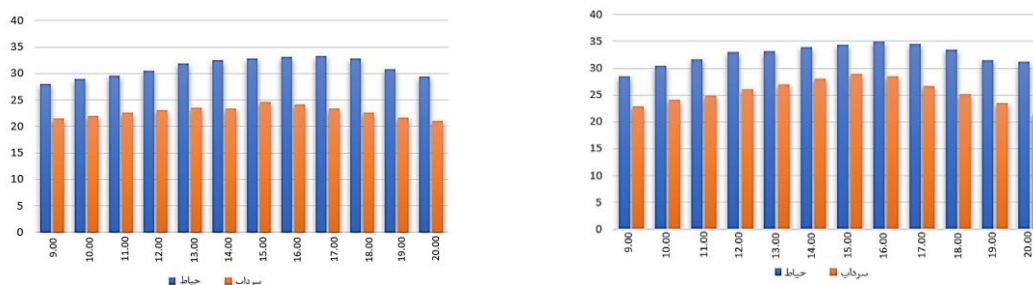
معدل "درجه حرارت هوا °C" تیپ ۴												نقاط	
۲۰	۱۹،۰۰	۱۸،۰۰	۱۷،۰۰	۱۶،۰۰	۱۵،۰۰	۱۴،۰۰	۱۳،۰۰	۱۲،۰۰	۱۱،۰۰	۱۰،۰۰	۹،۰۰		
۳۰،۲	۳۱،۰۲	۳۳،۰	۳۴،۹۰	۳۴،۵۰	۳۳،۲۰	۳۳،۱۰	۳۲،۹	۳۳،۲۰	۳۱،۲۰	۲۹،۱۰	۲۵،۱۰	متوسط نقاط حوض	حیاط open space
۳۶،۱	۳۶،۲۰	۳۷،۸۰	۳۷،۹۰	۳۸،۳۵	۳۸،۶۵	۲۶،۳۰	۳۵،۲۰	۳۴،۵۰	۳۳،۹۰	۳۳،۵۰	۳۲،۰۵	متوسط نقاط بالای دیوارها	
۲۷،۳	۲۷،۲۰	۲۹،۸۰	۳۱،۰	۳۲،۱۵	۳۱،۳۵	۳۲،۲۰	۳۱،۵۰	۳۱،۲۰	۳۰،۱۰	۲۹،۹۰	۲۸،۳۰	متوسط نقاط کف دیوارها	
۳۱،۲	۳۱،۴۷	۳۳،۵۳	۳۴،۶	۳۴،۹۶	۳۴،۳۶	۳۳،۸۶	۳۳،۲	۳۲،۹۶	۳۱،۷۳	۳۰،۵	۲۸،۴۸	میانگین کل	
۱۹،۹	۲۰،۲۰	۲۲،۱۰	۲۳،۸۰	۲۴،۶۰	۲۶،۲۰	۲۵،۵۰	۲۴،۲۰	۲۳،۱۰	۲۲،۳۰	۲۲،۰۵	۲۲،۲۰	متوسط نقاط حوض	سرداب close space
۲۵،۳	۲۷،۲۰	۲۹،۳۰	۳۰،۲۰	۳۳،۲۰	۳۵،۶۰	۳۴،۵۰	۳۳،۱۰	۳۲،۲۰	۳۱،۰	۳۱،۲۰	۳۰،۲۰	متوسط نقاط بالای دیوارها	
۲۰،۶	۲۳،۰۵	۲۴،۳۰	۲۶،۲۰	۲۷،۸۰	۲۷،۳۵	۲۶،۱۰	۲۴،۶۰	۲۳،۱۰	۲۱،۲۵	۲۰،۳۰	۱۹،۳۰	متوسط نقاط کف دیوارها	
۲۱،۵	۲۳،۴۸	۲۵،۳۳	۲۶،۷۳	۲۸،۵۳	۲۹،۰۱	۲۸،۰۳	۲۶،۹۶	۲۶،۱۳	۲۴،۸۵	۲۴،۱۸	۲۲،۹	میانگین کل	

شکل ۱۵. تغییرات دمایی در ۱۲ ساعت مختلف در نقاط مختلف تعیین شده در تیپ ۴ پژوهش

(داده های شکل ۱۵) در حیاط عدد ۳۴/۹۶ در گرم ترین ساعت روز (ساعت ۱۶) را نشان می دهد که تفاوت حدود ۶/۵ درجه دارد. از مقایسه داده های عددی مستخرج از دو جدول فوق و نمودارهای شکل های ۱۱ و ۱۲ پیداست که در کل تفاوت دما میان فضای حیاط و سرداب وجود دارد، اما در حالتی که یک منبع ایجاد رطوبت یعنی حوض به فضا اضافه شده است، تفاوت دمای میان این دو فضا بیشتر می شود. به این معنی که حضور آب در فضای سرداب در کنار ظرفیت حرارتی بالای فضای زیرزمینی موجب پایین آمدن بیشتر دما شده است. در حقیقت تفاوت متوسط دما میان دو فضای یادشده، در ساعت های مختلف روز در تیپ ۴ (بدون منبع رطوبت) حداقل ۵/۳۵ و حداکثر ۹/۷ و در تیپ ۱ (با منبع رطوبت در هر دو فضا) حداقل ۶/۹۳ و حداکثر ۱۱/۰۷ است.

لازم به ذکر است زمانی که منبع رطوبت در سرداب وجود دارد، تفاوت دمای کمتری در طول روز در این فضا به وجود آمده است. به این ترتیب، در گرم ترین ساعت های روز، که حیاط دمای بالاتری را به خود می بیند، اما همچنان دمای سرداب در شرایط

متعادلی قرار دارد. بنابراین در این ساعت‌ها اختلاف درجه حرارت میان سرداب و حیاط افزایش یافته است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).

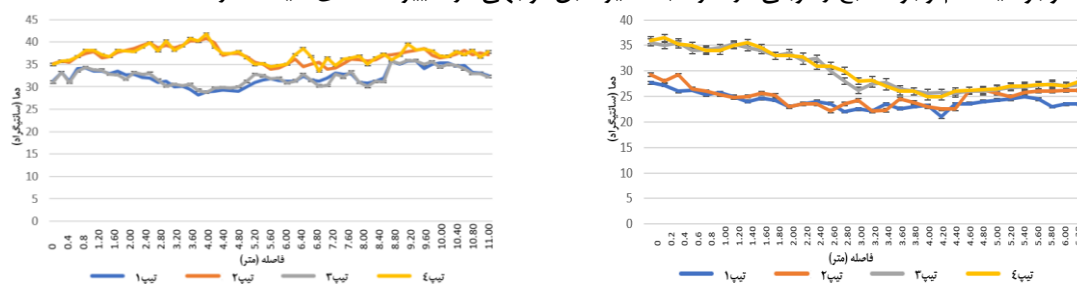


شکل ۱۶. جدول تغییرات دمایی طی ۱۲ ساعت روز، در تیپ ۴ مستخرج از نرم‌افزار سی‌اف‌دی
شکل ۱۷. جدول تغییرات دمایی طی ۱۲ ساعت روز، در تیپ ۱ مستخرج از نرم‌افزار سی‌اف‌دی

ارزیابی تغییرات دما در ارتفاع انسانی برای هر چهار تیپ مدنظر پژوهش

در پایان بررسی داده‌های دمایی در ارتفاع انسانی (۱۷۰ سانتیمتر از کف زمین)، به منظور ارزیابی مناسب‌تر با استفاده از داده‌های مستخرج از شبیه‌سازی انجام گرفت. این تغییرات دمایی در گرم‌ترین ساعت روز، یعنی ساعت ۱۵، برای هر چهار تیپ تحقیق و همین‌طور برای هر دو فضای حیاط و سرداب در نمودارهای شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. به منظور تعیین نقاط، در فضای سرداب در ارتفاع ۱۷۰ سانتیمتری از زمین و درست درمیانه فضا خطی ترسیم شد. این خط شامل ۳۲ نقطه به فاصله ۲۰ سانتیمتر از یکدیگر در سرداب و در فضای حیاط نیز با همین شرایط شامل ۵۵ نقطه در نظر گرفته شد. این مراحل برای هر چهار گونه مدنظر تحقیق انجام و داده‌های آن از نرم‌افزار استخراج گردید.

همان‌گونه که نمودارها نشان می‌دهد، برای سرداب در تیپ ۱ و ۲ در حالتی که منبع رطوبتی در فضا وجود دارد، دمای هوا تفاوت محسوسی نسبت به حالت بدون منبع رطوبت را نشان می‌دهد؛ به طور میانگین این تفاوت در حدود ۶/۵ درجه است. اما وجود حوض در حیاط، فقط ۱ درجه تفاوت دما بین تیپ‌های ۱ و ۲ (با و بدون حوض در حیاط) ایجاد کرده است و تیپ ۱ نهایتاً شرایط مناسب‌تری دارد. در حیاط نیز زمانی که منبع رطوبتی در فضا وجود دارد (تیپ‌های ۱ و ۳) شرایط دمایی مناسب‌تر است؛ تفاوت دما در حدود ۵ درجه سانتیگراد است. البته با توجه به قرارگیری حوض در سرداب در فضای بسته و ارتباط کم آن با فضای باز حیاط، وجود یا عدم وجود منبع رطوبتی در سرداب، تأثیر قابل توجهی در تغییرات دمای حیاط ندارد.



شکل ۱۸. نمودار تغییرات دما در سرداب برای هر چهار تیپ در ارتفاع انسانی (۱۷۰ سانتیمتر)
شکل ۱۹. نمودار تغییرات دما در حیاط برای هر چهار تیپ در ارتفاع انسانی (۱۷۰ سانتیمتر)

نتیجه‌گیری

این تحقیق در قالب یک پژوهش شبیه‌سازی و با استناد به داده‌های کمی و توصیف و تفسیر آن‌ها به بررسی تأثیر وجود یک منبع آب در خانه‌های مناطق کویری پرداخت. در واقع این پژوهش به بررسی نقشی از ذرات آشفته (رطوبت) در یک جریان دوفازی و ناپایدار در سیالات (هوا، ذرات آب) در پایین‌آوردن دما و ایجاد آسایش حرارتی پرداخته است. این فرایند با بررسی رفتار جریان ذرات و پیگیری تغییرات آن در طول زمان ارزیابی شد. درنهایت خلاصه‌ای از نتایج آن به شرح زیر ارائه می‌شود:

– حوض، که یک منبع ایجاد رطوبت است، از طریق افزایش میزان رطوبت نسبی کمی به کاهش دما کمک می‌کند، اما نقش

اصلی آن در ایجاد آسایش حرارتی، به دلیل کاهش اثرات منفی هوای خشک با استفاده از ترکیب رطوبت و جریان هوای شکل گرفته در محیط سرداب و حیاط است.

- با حرکت جریان هوا از سمت بادگیر به دلیل ایجاد شرایط دودکش و همین‌طور حالت مکش، باعث به وجود آمدن ریزگردبادهایی در محیط بسته می‌شود که به خنک کردن فضا کمک می‌کند. در حالتی که این ریزگردابه‌ها با قطره‌های ریز حاصل از رطوبت در هوای خشک منطقه گرم و خشک ترکیب شوند، به کاهش دما و ایجاد آسایش حرارتی کمک بیشتر می‌کند. این کاهش دما در نقاط اطراف منبع رطوبت یعنی حوض آب بیشتر است.

- به این دلیل که گردش هوا در محیط بسته در سرداب صورت می‌گیرد و قطره‌های حاصل از رطوبت و همین‌طور جریان هوا، در تماس با شرایط جو قرار ندارند؛ لذا این کاهش دما در طول روز با نوسان کمتری نسبت به حیاط، که در معرض مستقیم جو قرار دارد، است.

- هرچند بهترین شرایط ایجاد آسایش حرارتی در گونه وجود حوض در هر دو فضای سرداب و حیاط است، اما این‌گونه در همه خانه‌های مناطق کویری وجود ندارد. به نظر می‌رسد مشکل کمبود آب به خصوص در فصول گرم سال، مانع از استفاده دائمی حوض آب در فضا به خصوص در بخش سرداب شده است. همچنین به دلیل کاهش دمای هوا، ناشی از فرورفتن ساختمان به داخل زمین و ایجاد پایداری حرارتی و آسایش نسبی، در مواردی نیز ممکن بود به این دلیل تصمیم به حذف حوض از فضا گرفته شود.

- اگر حوضخانه محل زیست تلقی می‌شد، طبق یافته‌های کمی تحقیق، وجود یک حوض به منظور ارتقای آسایش حرارتی و سایر عوامل عملکردی می‌توانست نقش مؤثری ایفا کند. اما اگر فضای سرداب صرفاً عملکردی نظیر انبار را داشت، نیازی به تعبیه حوض آب از این نظر در سرداب وجود نداشت.

- مطابق نتایج به دست آمده از تحقیق، وجود حوض در فضای حیاط هم در پایین آوردن دما و هم رطوبت نسبی در مقایسه با شرایطی که حوض وجود ندارد، نقش مهمی دارد. بنابراین وجود آن در مرکز حیاط خانه‌های مناطق کویری، به منظور تأمین آسایش حرارتی در گرم‌ترین روزهای سال به خصوص به منظور ایجاد رطوبت ضروری به نظر می‌رسد. این در حالی است که وجود حوض در سرداب در پایین آمدن دما و رطوبت نسبی به دلیل ظرفیت حرارتی خاک و ثابت بودن دما در بخش زیرین زمین ضرورت کمتری دارد.

- از سوی دیگر، به دلیل نقش پررنگ عملکردی فضای حیاط در خانه‌های سنتی، که گره متصل‌کننده فضاها به یکدیگر است، وجود حوض در آن ضروری به نظر می‌رسد. زیرا ساکنان در آن حضور دائمی داشته‌اند و بخشی از تعاملات خانه در آن اتفاق می‌افتاد. لذا با وجود مشکلات مربوط به تأمین آب، در اکثر خانه‌های سنتی این مناطق حوض در بخش حیاط دیده می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که منبع تأمین رطوبت و تعدیل دما در خانه‌های سنتی فقط حوض نیست، بلکه پوشش گیاهی و سایه‌اندازی درختان نیز نقش قابل توجهی در کاهش خشکی هوا دارند و به همین دلیل نقش آن‌ها در افزایش احساس آسایش حرارتی در کنار حوض در حیاط، باید مورد توجه قرار گیرد. در عین حال، باید این نکته را نیز لحاظ کرد که ایجاد پوشش گیاهی گسترده مستلزم آبیاری دائمی است که در مناطق گرم و خشک به خصوص در فصول گرم سال امکان‌پذیر نیست.

- با توجه به تأثیر آب در تأمین آسایش حرارتی حیاط (خرداقلیم و در مقیاس کوچک) به نظر می‌رسد این امکان وجود دارد که چنین نتایجی برای شهر (کلان‌اقلیم و مقیاس بزرگ) نیز پاسخ دهد. به این معنی که چنین شبیه‌سازی برای شهر نیز انجام شود و از نتایج آن برای پایین آوردن دمای هوای شهرها به خصوص در مناطق کویری و در روزهای گرم سال استفاده شود.

- وجود زیرزمین در خانه‌ها ممکن است جنبه‌های منفی مانند کاهش استفاده از نور طبیعی روز و محبوس شدن (ساکن‌ماندن) هوا را در پی داشته باشد، اما می‌توان با تمهیداتی (نظیر ایجاد تهویه به وسیله کوران هوا، نیمه‌زیرزمین‌سازی، استفاده از حوض و...) تا حد امکان این مشکلات را برطرف کرد و از آن فضای پایدار و سبز، که با بهره‌گیری از یک منبع آب، آسایش حرارتی قابل توجهی را ایجاد می‌کند و نهایتاً کاهش مصرف انرژی را در پی دارد، استفاده کرد.

– در مقایسه با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، به نظر می‌رسد که پژوهش مستقیمی در این رابطه و با در نظر گرفتن این متغیرها انجام نشده است. اما تحقیقات بسیاری در زمینه تأثیر حرارتی آب یا رطوبت، بر کاهش دمای محیط در قالب سیستم‌های پاشش آب^{۱۲} بررسی شده است. این بررسی‌ها در کاربری‌های گوناگون اعم از آموزشی، گلخانه، مسکونی و... به انجام رسیده است (Gorji Mahlabani et al., 2022; Ghoulem et al., 2020; M Kassir, 2016). این مسئله نشان می‌دهد که استفاده از هر نوع منبع رطوبت در محیط‌های گرم‌وخشک نه تنها به آسایش حرارتی و دستیابی به دمای مطلوب در محیط کمک می‌کند، بلکه در افزایش راندمان عملکردی محیط نیز نقش قابل توجهی دارد.

References

- Yazdi, Y., mofidi Shemirani, S. M., & Etessam, I. (2019). A Survey on the Design Standards of Central Courtyard and Summer Hall in Yazd Qajar Houses. *Islamic Art Studies*, 15(34), 93-111. (In Persian)
- Akhtarkavan, M., & Fallahi, S. (2020). The Study of Internal Thermal Comfort in Traditional Dwellings in Hot & Dry Climate of Iran (Case Study: Atar-ha house in Kashan). *Indigenous Knowledge*, 7(13), 421-452. (In Persian)
- Soheili, J., & Gol Baten Monfared, K. (2019). Water Quality and Quantity in Iranian-Islamic Residential Architecture. *Naqshejahan-Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 8(4), 249-257.
- The website of the country's meteorological organization, information about the weather of Yazd city, 2013. (In Persian)
- Kasmai, Morteza. (1382). *Climate and Architecture*, Tehran: Khak. (In Persian)
- detailed urban planing of Yazd city, Armanshahr consulting engineers, 2018. (In Persian)
- Afonso C. & Oliveira A. (2000). Solar chimneys: simulation and experiment. *Energy Build*; 32:71–9.
- Azizi-Bondarabadi, H. & Haji Sadeghi, N. (2022), Local seismic culture in Iranian vernacular architecture: evidence from Yazd earthen architecture. *Built Heritage*, (2022) 6:5.
- Carreto-Hernandez, L. G., Moya, S. L., Baez-García, W. G., Herazo, L. C. S., Francisco-Hernandez, A., Hernández-Jerónimo, J. C. & Téllez-Velázquez, E. (2024). Numerical-experimental investigation of a wind tower-room sustainable system: A parametric analysis of the mixed convection with humidification. *Journal of Building Engineering*, 109624.
- Chandramohan, V. P. (2016), Experimental Analysis and Simultaneous Heat and Moisture Transfer with Coupled CFD Model for Convective Drying of Moist Object. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 17:59–71.
- Foruzanmehr, A., & Nicol, F. (2008). Towards new approaches for integrating vernacular passive-cooling systems into modern buildings in warm-dry climates of Iran. *In Proceeding of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Windsor, London.
- Foruzanmehr, A. & Vellinga, M. (2011). Vernacular architecture: questions of comfort and practicability. *Building Research & Information*, 39(3), 274-285.
- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Zhong, F. & Calautit, J. (2020). Design of a passive draught evaporative cooling windcatcher (PDEC-WC) system for greenhouses in hot climates. *Energies*, 13(11), 2934.
- Gorji Mahlabani, Y., Yaghoubi Moghaddam, M., Hakim Azari, M. & Torabi, F. (2022). Design of a new hybrid windcatcher and ground source heat pump system. *Energy Equipment and Systems*, 10(1), 51-71.
- Hussain, M.M. & I. Dincer, (2003). Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis of a Cylindrical Moist Object Subjected to Drying: A Finite- Difference Approach. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46, 4033-4039.
- Izadpanahi, P., Farahani, L. M. & Nikpey, R. (2021). Lessons from sustainable and vernacular passive cooling strategies used in traditional 55ranian houses. *Journal of Sustainability Research*, 3(3).
- Kassir, R. M. (2016). Passive draught evaporative cooling wind-towers: A case study using simulation with field-corroborated results. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(1), 103-120.
- Kaya, A. & Aydın, O. (2007), Numerical Modeling of Forced Convection Drying of Cylindrical Moist Objects, *Numer. Heat Transfer, Part-A*, 51, 843–854.
- Kaya, A., Aydın, O. & Dincer I, I. (2008). Heat and Mass Transfer Modeling of Recirculating Flows During Air Drying of Moist Objects for Various Dryer Configurations, *Numer. Heat Transfer, Part-A*, vol. 53, 18–34.
- Keshtkaran, P. (2011). Harmonization between climate and architecture in vernacular heritage: a case study in Yazd, Iran, *Procedia Engineering*, 21(2011) 428-438.
- Khalili, M., & Amindeldar, S. (2014). Traditional solutions in low energy buildings of hot-arid regions of Iran. *Sustainable Cities and Society*, 13, 171-181.
- Mahmoudi Zarandi, M. (2009), Analysis on Iranian Wind Catcher and Its Effect on Natural

- Ventilation as a Solution towards Sustainable Architecture (Case Study: Yazd), *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:3, No:6.
- Oztop, H.F & Akpınar, E.K. (2008). Numerical and Experimental Analysis of Moisture Transfer for Convective Drying of Some Products, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 35, no. 2, 169–177.
- Passe, U. & Battaglia, F. (2015). *Designing spaces for natural ventilation: an architect's guide*. Routledge.
- Porras-Amores, César, Fernando R. Mazarrónb, Ignacio Cañas, Paola Villoría Sáez, (2019). Natural ventilation analysis in an underground construction: CFD simulation and experimental validation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90(2019), 162–173.
- Sadooghi, A., Kibert, C., Sadeghi, F. M., & Jafari, S. (2019). Thermal performance analysis of a traditional passive cooling system in Dezful, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 291-302.
- Saljoughinejad, S., & Rashidi Sharifabad, S. (2015). *Building and Environment*, 92(2015), 475-493.
- Simal, S., Rossello, S., Berna, A. & Mulet, A. (1998). Drying of Shrinking Cylinder-shaped Bodies. *J. Food Eng.*, vol. 37, 423–435.
- Soltanzadeh, H., & Bideli, M. (2015). *The Role of Cellars in Reducing Energy Consumption in the Residential Architecture of Iran*.
- Tolou Behbood Kamyar, Mohammad Taleghani and Shahin Heidari, (2010). *Building Research Information Knowledgebase*.
- Van Belleghem Marnix, Hendrik-Jan Steeman, Marijke Steeman, Arnold Janssens, Michel De Paepe, (2010). *Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling*. *Building and Environment*, 45(2010), 2485-2496.
- Wen, Yueming Siu-Kit Lau, Jiawei Leng, Kai Zhou, Shi-Jie Cao, (2023). Passive ventilation for sustainable underground environments from traditional underground buildings and modern multiscale spaces, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 134(2023) 105002.
- www.cyberarchi.com
[https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html#IDYA_Yazd-](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html#IDYA_Yazd)

DOI: <https://doi.org/10.22034/43.186.4>