

## تحلیل عملکرد انرژی در معماری بومی ارگ بم با استفاده از شبیه‌سازی انرژی ساختمان

ثنا آذرطوسی

۱. دانشجوی کارشناسی معماری، دانشگاه بناب، بناب، ایران

sana.azartoosi.8082@gmail.com

مریم محمودی

۲. کارشناسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران

maryam1mahmoudii@gmail.com

توحید ادیبی

۳. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران

tohidadibi@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۱۹

صفحه ۷۵-۵۴

### چکیده

**بیان مسأله:** مصرف انرژی در ساختمان‌ها یکی از چالش‌های مهم جهانی و به‌ویژه در ایران است. تأمین شرایط آسایش حرارتی شامل گرمایش و سرمایش در اقلیم‌های گرم و خشک، به دلیل هزینه بالای تجهیزات و انرژی، فشار زیادی بر جامعه وارد می‌کند. در معماری سنتی ایران، بهره‌گیری هوشمندانه از عناصر اقلیمی و مصالح بومی، نقش مؤثری در کاهش نیاز به سامانه‌های مکانیکی داشته است. با توجه به این ظرفیت‌ها، ضرورت بررسی کمی عملکرد این ویژگی‌ها در بناهای شاخص همچون ارگ بم افزایش یافته است.

**هدف پژوهش:** ۱- ارزیابی میزان توانایی فرم و مصالح معماری سنتی ارگ بم در تأمین آسایش حرارتی بدون سامانه‌های مکانیکی. ۲- سنجش میزان کاهش نوسانات دمای روزانه و فصلی در فضاهای داخلی و نقش مصالح بومی نظیر خشت و چوب خرما در این کارکرد. ۳- تحلیل شواهد حاصل از شبیه‌سازی انرژی در DesignBuilder برای تأیید عملکرد غیرفعال و پایدار معماری سنتی در کاهش مصرف انرژی.

**سؤال پژوهش:** ۱- آیا فرم و مصالح به‌کاررفته در معماری سنتی ارگ بم، بدون استفاده از سامانه‌های مکانیکی، قادر به تأمین آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک هستند؟ ۲- چه میزان از نوسانات دمایی روزانه و فصلی در فضای داخلی ارگ بم کاهش یافته و این بهینه‌سازی تا چه اندازه به عملکرد مصالح بومی نظیر خشت و چوب خرما وابسته است؟ ۳- نتایج شبیه‌سازی انرژی با DesignBuilder چه شواهدی برای تأیید عملکرد غیرفعال و پایدار ساختمان‌های سنتی در کاهش مصرف انرژی ارائه می‌دهد؟

**روش پژوهش:** در این مطالعه عملکرد انرژی فضاهای داخلی ارگ بم با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و داده‌های اقلیمی شهر بم شبیه‌سازی شده است. تحلیل بارهای حرارتی و تغییرات دمای عملیاتی در فصول مختلف، برای بررسی نقش جرم حرارتی مصالح خشتی، جانمایی فضاها و تهویه طبیعی در ارتقای عملکرد غیرفعال بنا انجام شده است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد که جرم حرارتی بالای مصالح خشتی، آرایش فضایی مناسب و تهویه طبیعی، کاهش قابل‌توجهی در نیاز به گرمایش و سرمایش مصنوعی ایجاد می‌کنند. همچنین شبیه‌سازی‌ها بیانگر کاهش محسوس نوسانات دمایی داخلی در برابر تغییرات شدید اقلیم گرم و خشک هستند. تحلیل بارهای حرارتی و دماهای عملیاتی، کارآمدی راهکارهای سنتی در پاسخ‌گویی به شرایط سخت اقلیمی و اهمیت بازخوانی اصول معماری بومی در توسعه ساختمان‌های پایدار و کم‌مصرف را تأیید می‌کند.

**واژگان کلیدی:** آسایش حرارتی، سیستم‌های مکانیکی، ارگ بم، تهویه طبیعی، معماری سنتی، سرمایش



## Analysis of Energy Performance in the Vernacular Architecture of the Bam Citadel Using Building Energy Simulation

Sana Azartoosi

1. Bachelor Student in Architecture, University of Bonab, Bonab, Iran,

Maryam Mahmoudi

2. Bachelor Student in Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

Tohid Adibi

3. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran,

Received: 29/09/2025

Accepted: 09/03/2026

Page 54-75

### Abstract

**Problem Statement :** With its towering walls and extraordinary architecture, the Bam Citadel was not merely a military fortress but a complete city encompassing all the elements of a vibrant and dynamic society. From prosperous markets and spiritually uplifting mosques to simple and luxurious houses, every component testifies to the lively existence of people who once lived within these walls. Once a center of commerce and culture, the citadel today stands as a symbol of the resilience and grandeur of Iranian history. Since Bam Citadel was constructed using traditional materials such as adobe and palm wood, the significance of utilizing sustainable and local materials in its construction becomes particularly evident. Building with compacted earth is an ancient technique that is valuable not only culturally but also environmentally. Due to its high thermal mass, this method stabilizes indoor temperatures and reduces the energy required for heating and cooling. The materials used in Bam Citadel possess low embodied energy, meaning that the energy consumed for extraction, processing, and transportation is significantly lower than that required for modern materials such as concrete and steel. Furthermore, the use of earth and local materials reduces the project's carbon footprint and ensures climatic compatibility. Given the unique characteristics of Bam Citadel and the climatic and geographical conditions of the region, a comprehensive and precise study of the thermal, mechanical, and environmental performance of such structures from a regional and indigenous perspective is highly important. Recent studies adopting broader approaches have examined the impact of various additives, construction techniques, and climatic conditions on the performance of earthen materials. These investigations demonstrate that additives such as fly ash, natural fibers, and industrial waste materials can improve mechanical resistance and thermal behavior while preserving environmental sustainability. In recent years, increasing attention has been directed toward traditional architecture, particularly earthen structures, due to their environmental characteristics and favorable thermal performance. Research indicates that structures such as rammed-earth walls, especially in hot and humid climates, can effectively regulate indoor temperatures without the need for mechanical heating and cooling systems. Additionally, the use of indigenous materials and climate-responsive design strategies can provide thermal comfort during most days of the year. These characteristics have made traditional earthen architecture not only environmentally sustainable but also highly energy efficient and therefore suitable as a model for contemporary architectural development

in hot and arid regions. Research Methodology Building energy simulation processes first emerged after the oil crisis of the 1970s. Over recent decades, these processes have been implemented through diverse computer systems that utilize advanced mathematical processing and graphical visualization capabilities. Today, numerous building energy simulation software packages—both commercial and free—are available. Since 1996, the United States Department of Energy has maintained a list of approximately one hundred computational tools while also developing several open-source software systems. For importing climatic conditions into the simulations, a valid EPW weather file for the city of Bam was downloaded from the official EnergyPlus Weather Data database of the U.S. Department of Energy. This file includes hourly data on temperature, relative humidity, solar radiation, and wind speed throughout an entire year and served as the primary climatic data source for the present study.

To verify and validate the data, the outputs of this file were compared with data generated by Meteonorm software. The comparison demonstrated that temperature and solar radiation trends in both datasets were similar, and discrepancies remained within acceptable ranges. Therefore, the EnergyPlus file was used as the primary dataset, while Meteonorm data functioned as supplementary and validation tools. Several scenarios involving variations in internal loads, natural ventilation, and the presence or absence of shading devices were designed and implemented to analyze the thermal behavior of the spaces throughout the year.

**Research Objectives :** To evaluate the capability of the traditional form and materials of Bam Citadel architecture in providing thermal comfort without mechanical systems. To measure the reduction of daily and seasonal temperature fluctuations within interior spaces and assess the role of indigenous materials such as adobe and palm wood in this performance. To analyze evidence obtained from energy simulations in DesignBuilder in order to confirm the passive and sustainable performance of traditional architecture in reducing energy consumption.

#### Research Questions

1. Are the form and materials employed in the

traditional architecture of Bam Citadel capable of providing thermal comfort in a hot and arid climate without mechanical systems?

2. To what extent are daily and seasonal temperature fluctuations reduced within the interior spaces of Bam Citadel, and how dependent is this optimization on indigenous materials such as adobe and palm wood?

3. What evidence do DesignBuilder energy simulations provide in support of the passive and sustainable performance of traditional buildings in reducing energy consumption?

**Conclusion:** The present study employed building energy simulation in DesignBuilder software to examine thermal comfort conditions and energy consumption in Bam Citadel as a prominent example of traditional architecture in Iran's hot and arid climate. Simulation results demonstrated that indigenous materials such as adobe and palm wood, together with appropriate spatial design, play a substantial role in regulating indoor temperature and reducing cooling loads. The simulations further revealed that although the local materials used in Bam Citadel—raw adobe and palm wood—cannot independently provide complete thermal comfort according to international standards, they significantly contribute to reducing indoor temperature fluctuations and decreasing cooling and heating demands. Therefore, these materials should be regarded as effective climatic solutions for improving energy efficiency in traditional buildings and as inspirational models for sustainable contemporary design. The findings indicate that the architectural design of Bam Citadel, relying on indigenous materials such as adobe and palm wood and a compact geometric form, succeeded in providing an acceptable level of thermal comfort during warm seasons despite the absence of active mechanical systems. DesignBuilder simulations revealed that indoor air temperatures frequently remained within the comfort range defined by international standards, while the severe temperature fluctuations characteristic of Bam's hot and arid climate were significantly moderated within the building. This favorable thermal performance, especially during peak heat hours, demonstrates that traditional Iranian architecture was intelligently adapted to climatic conditions. Moreover, dynamic analysis

of energy consumption showed a substantial reduction in the need for mechanical cooling, highlighting the remarkable capacity of passive strategies for energy control. Ultimately, by providing quantified evidence regarding the thermal performance of a traditional structure, this research strengthens the scientific position of energy analysis in historical architecture and paves the way for similar comparative studies in other traditional contexts.

**Keywords:** Thermal Comfort, Mechanical Systems, Arg-e Bam, Natural Ventilation, Traditional Architecture, Cooling.

#### References:

1. Alfaro, S., Aguilar, R., & Pando, M. (2019). Thermal behavior of adobe walls in hot-dry climates. *Energy and Buildings*, 199, 134–144.
2. Arroyo, J., Spiessens, F., & Helsen, L. (2022). Comparison of optimal control techniques for building energy management. *Frontiers in Built Environment*, 8, 849754.
3. Asan, H. (2006). Numerical computation of time lag and decrement factor for different building materials. *Building and Environment*, 41(5), 615–620. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>
4. Attia, S., Evrard, A., & Gratia, E. (2012). Development of benchmark models for the Egyptian residential buildings sector. *Applied Energy*, 94, 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.065>
5. Azizi-Bondarabadi, H., & Haji Sadeghi, N. (2022). Local seismic culture in Iranian vernacular architecture: Evidence from Yazd earthen architecture. *Built Heritage*, 6(1), 5.
6. Bailly, G. C., et al. (2024). Advancing earth-based construction: A comprehensive review of stabilization and reinforcement techniques for adobe and compressed earth blocks. *Eng*, 5(2), 750–783.
7. Carrobé, A., Rincón, L., & Martorell, I. (2021). Thermal monitoring and simulation of earthen buildings: A review. *Energies*, 14(8), 2080.
8. Christopher, A., Rahman, M., & Hassan, A. (2021). Orientation-based passive design strategies in traditional Middle Eastern architecture. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103045.
9. Crawley, D. B., et al. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
10. Foruzanmehr, A., & Vellinga, M. (2011). Vernacular architecture: Questions of comfort and practicability. *Building Research & Information*, 39(3), 274–285. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.561885>
11. Francisco, P., Nicolle, J., & Corgnati, S. (2018). Spatial configuration and thermal resilience in vernacular courtyard houses. *Building and Environment*, 145, 155–170.
12. Guillaud, H. (2008). Characterization of earthen materials. In *Terra literature review— an overview of research in earthen architecture conservation* (pp. 21–31). The Getty Conservation Institute.
13. HabibAbad, A. S. (2015). The essence of Islamic architecture of mosques: A reflection on the spiritual identity and sacred suppositions. *Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, 36(4).
14. Huang, J., Li, Y., & Yang, X. (2020). Time-lag characteristics of thermal mass materials in passive buildings. *Journal of Building Engineering*, 32, 101566.
15. Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation. *Applied Energy*, 92, 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
16. Li, S., et al. (2022). Energy saving and thermal comfort performance of passive retrofitting measures for traditional rammed earth house in Lingnan, China. *Buildings*, 12(10), 1716.
17. Minke, G. (2006). *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. De Gruyter.
18. Niroumand, H., et al. (2021). A systematic literature review of rammed earth walls. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 58(4), 295–301.
19. Oliveti, G., Arcuri, N., De Simone, M., & Bruno, R. (2014). Solar heat gains and thermal behavior of adobe walls. *Energy and Buildings*, 84, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.013>
20. Passer, A., et al. (2020). Sustainable built environment: Transition towards a net zero carbon

- built environment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(6), 1160–1167.
21. Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2003). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 35(7), 762–776. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00117-2)
  22. Ravankhah, M., et al. (2017). Integration of cultural heritage into disaster risk management: Challenges and opportunities for increased disaster resilience. *Going Beyond: Perceptions of*
  23. Rouhi, J. (n.d.). The impact of cultural and environmental factors on architectural typology of Bam Citadel.
  24. Rouhi, J., & Aveta, B. G. M.-A. (2016). Issues and significances of a reconstructed cultural landscape: The case study of Bam and its cultural landscape. In 4th International Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management.
  25. Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). Passive cooling of buildings. James & James. <https://doi.org/10.4324/9781315071818>
  26. Silva, R. A., et al. (2013). Conservation and new construction solutions in rammed earth. In *Structural rehabilitation of old buildings* (pp. 77–108). Springer.
  27. Valenzuela, M., et al. (2025). Designing sustainable cement free compositions with rice husk ash to improve mechanical performance in next generation ecoblocks. *Scientific Reports*, 15(1), 14920.
  28. Wasilowski, H., Reinhart, C., & Samuelson, H. (2009). Modeling an existing building in DesignBuilder/EnergyPlus: Custom vs. default inputs.
  29. Zhang, R., & Hong, T. (2016). Modeling and simulation of operational faults of HVAC systems using EnergyPlus.
- Irwin, R. (1997). *Islamic art*. Laurence King.
- Jalili, A., & Moshiri, E. (2013). Ebtakarāt-e zehni dar be-kār-gīrī-ye rooyehā-ye hesābdārī-ye modiriyat. *Danesh-e Hesābdārī*, 2(6), 41–50.
- Javani, A., Belkhari, H., & Asadi, M. (2018). Āykonogrāfi-ye peykareh-ye sofallin-e Soltān Toghrol-e Saljūqī. *Honarhā-ye Zībā*, 23, 93–102.
- Karbasi, M. (Trans.). (1999). *Farhang-e mosavvar-e nemādhā*. Farshad.
- Koch, H. M. (2006). *Tārikh-e farhangī-ye Irān* (R. Ghasemian, Trans.). Tahuri.
- Kohen, H. (1994). *Zartosht va hekmat-e Irān-e bāstān* (Z. Mansuri, Trans.). Toos.
- Kozari, M. J. (2016). *Nāmeḥ-ye Bāstān: Gozāresh-e Shāhnāmeḥ-ye Ferdowsī (Dāstān-e Siyāvaš)*. Samt.
- Makdis, U. (1992). *Farhang-e afsānehā-ye mardom-e Irān* (M. Ketirāyi, Trans.). Soroush.
- Madadpour, S. H. (1995). *Zibāyī-shenāsī dar honar va adab-e Irān*. Samt.
- Moin, M. (1996). *Farhang-e Fārsī-ye Mo‘in*. Amir Kabir.
- Namaz-Alizadeh, S., & Mousavi-Lar, A. S. (2019). Āykonolojī-ye negarreh-ye Leyli va Majnun dar sofall-e Saljūqī. *Bāgh-e Nazar*, 16(75), 47–52.
- Nyberg, H. S. (1938). *Die Religionen des alten Iran*. Hinrichs.
- Panofsky, E. (2009). *Iconography and iconology: An introduction to the study of Renaissance art*. In D. Preziosi (Ed.), *The art of art history* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Panofsky, E. (2018). *Studies in iconology*. Routledge.
- Panofsky, E. (2017). *Ma‘nā dar honarhā-ye tajassomī* (N. Akhavan-Moghadam, Trans.). Cheshmeh.
- Pur-Bāz, R. (2004). *Dāyerat-ol-ma‘āref-e honar*. Farhang-e Mo‘aser.
- Pur-Bāz, R. (2004). *Naqqāshi-ye Irān: Az dirbāz tā emruz*. Zarrin va Simin.
- Rastgār-Fasāyi, M. (2004). *Adabiyāt-e ghanāyi va dāstānī dar adab-e Fārsi*. Ferdows.
- Razi, H. (2000). *Farhang-e ma‘āref-e Zartoshti*. Āgāh.
- Sarkārāni, P. (1971). *Parī dar asātīr-e Irān*. Anjoman-e Āthār-e Mellī.
- Sarkārāni, B. (1971). *Sāyehā-ye shekār shodeh*. Qatre.
- Shamali, A. (Trans.). (1990). *Farhang-e nemādhā*. Jeyhun.
- Talebian, H., & Hassani, S. (2022). Āykonogrāfi-ye naqsh-māyeh-ye māhi dar sofallinehā-ye Saljūqī. *Proceedings of the 2nd International Conference on Islamic Architecture and Arts*. Islamic Art University of Tabriz.
- Yahaqqi, M. J. (n.d.). *Farhang-e asātīr va dāstān-vārehā dar adabiyāt-e Fārsi*. Farhang-e Mo‘aser.
- Web Reference:  
Oxford, Bodleian Library, MS Ouseley 381. (n.d.). Digital manuscript. URL1: (digital archive reference provided in user text).

## مقدمه و بیان مسئله

ارگ بم، که با نام "ارگ قدیم" نیز شناخته می‌شود، همچون نگینی درخشان در گوشه‌ی شمال شرقی شهر امروزی بم می‌درخشد. این بنای شکوهمند، که گواهی زنده بر تاریخ پرفرازونشیب این سرزمین است، در سال ۱۳۸۳ خورشیدی با عنوان «بم و فضای فرهنگی آن» در فهرست میراث جهانی یونسکو جای گرفت. این افتخار نه تنها نشان‌دهنده‌ی ارزش تاریخی و فرهنگی این اثر بی‌نظیر است، بلکه بر اهمیت حفظ و نگهداری آن برای نسل‌های آینده نیز تأکید می‌کند. (روانخواه و همکاران، ۱۳۹۶)

ارگ بم، که روزگاری در مسیر پررونق و افسانه‌ای «جاده ابریشم» قرار داشت، روایتی از تبادل فرهنگ‌ها، تجارت و ارتباطات میان تمدن‌های بزرگ جهان را در خود جای داده است. قدمت این دژ عظیم به سده‌ی پنجم پیش از میلاد بازمی‌گردد، زمانی که هنوز امپراتوری‌های بزرگ جهان باستان در اوج شکوه خود بودند. این ارگ، که قرن‌ها شاهد رویدادهای تاریخی پرفرازونشیب بوده، تا قرن اخیر نیز همچنان پابرجا و مورد استفاده قرار می‌گرفت. این بنا با دیوارهای سر به فلک کشیده و معماری خارق‌العاده‌اش، نه تنها یک قلعه‌ی نظامی، بلکه شهری کامل با تمامی عناصر یک جامعه‌ی زنده و پویا بود. از بازارهای پررونق و مساجد روح‌نواز گرفته تا خانه‌های ساده و مجلل، همه و همه گواهی بر زندگی پرجنب‌وجوش مردمانی است که روزگاری در این دیوارها می‌زیستند. این ارگ، که روزگاری مرکز تجارت و فرهنگ بود، امروزه به‌عنوان نمادی از مقاومت و شکوه تاریخ ایران، همچنان استوار و پابرجاست (Bam and its Cultural Landscape, ۲۰۰۴)

از آنجاکه ارگ بم با مصالح سنتی خشت و چوب خرما ساخته شده است، اهمیت استفاده از مصالح پایدار و محلی در ساخت آن برجسته می‌شود. ساخت‌وساز با استفاده از خاک متراکم، روشی دیرینه است که نه تنها از نظر فرهنگی

بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز ارزشمند است. این روش، به دلیل جرم حرارتی بالا، باعث تثبیت دمای داخل فضاها شده و انرژی مصرفی برای گرمایش و سرمایش را کاهش می‌دهد (Guillaud, ۲۰۰۸).

مصالحی که در ارگ بم به کار رفته‌اند، انرژی نهفته کمی دارند، یعنی انرژی مصرف‌شده برای استخراج، پردازش و حمل‌ونقل آن‌ها بسیار پایین‌تر از مصالح مدرن همچون بتن و فولاد است. همچنین استفاده از خاک و مصالح محلی ردپای کربنی پروژه را کاهش می‌دهد و سازگاری با اقلیم منطقه را تضمین می‌کند (Minke, ۲۰۰۶).

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد ارگ بم و شرایط اقلیمی و جغرافیایی منطقه، مطالعه جامع و دقیق عملکرد حرارتی، مکانیکی و زیست‌محیطی این نوع سازه‌ها با رویکردی بومی و منطقه‌ای اهمیت دارد. بررسی تأثیر مصالح، افزودنی‌ها و تکنیک‌های مختلف ساخت می‌تواند راهگشای حفاظت و احیای این میراث ارزشمند باشد (Silva et al, ۲۰۱۳).

مطالعات اخیر با رویکردی جامع‌تر، به تحلیل تأثیر افزودنی‌های مختلف، تکنیک‌های ساخت و شرایط اقلیمی بر عملکرد مصالح خاکی پرداخته‌اند. این تحقیقات نشان می‌دهند که افزودنی‌هایی مانند خاکستر بادی، الیاف طبیعی و ضایعات صنعتی می‌توانند مقاومت مکانیکی و رفتار حرارتی مصالح را بهبود بخشیده و درعین حال پایداری زیست‌محیطی آن‌ها را حفظ کنند (Bailly et al, ۲۰۲۴).

در سال‌های اخیر، توجه به معماری سنتی و به‌ویژه سازه‌های خاکی، به دلیل ویژگی‌های زیست‌محیطی و عملکرد حرارتی مطلوب آن‌ها افزایش یافته است. تحقیقات نشان می‌دهد که سازه‌هایی مانند دیوارهای رمپ‌شده خاکی، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و مرطوب، می‌توانند به‌خوبی دمای داخلی فضا را بدون نیاز به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی مکانیکی کنترل کنند (Li et al, ۲۰۲۲)

همچنین، استفاده از مصالح بومی و طراحی‌های منطبق با اقلیم، امکان دستیابی به شرایط آسایش حرارتی را در بیشتر روزهای سال فراهم می‌سازد (Carrobé et al, ۲۰۲۱). این ویژگی‌ها باعث شده تا معماری سنتی خاکی، نه تنها از نظر زیست‌محیطی پایدارتر، بلکه از منظر بهره‌وری انرژی نیز گزینه‌ای مناسب برای توسعه معماری معاصر در مناطق گرم و خشک باشد. از سوی دیگر، لازم است تا با توجه به شرایط خاص هر منطقه و ویژگی‌های بومی، استراتژی‌های طراحی و ساخت متناسب اتخاذ شود تا ضمن حفظ اصالت و ارزش‌های فرهنگی، کارایی و دوام سازه‌های خاکی افزایش یابد (Valenzuela et al, ۲۰۲۵).

این مطالعات نه تنها به بهبود حفاظت و بازسازی بناهای تاریخی مانند ارگ بم کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند مسیر را برای توسعه پایدار ساخت‌وساز در مناطق مشابه هموار سازند، جایی که منابع محلی فراوان و نیاز به مصالح کم‌هزینه و کم انرژی محسوس است.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از نرم‌افزار DesignBuilder و فایل اقلیمی شهر بم، شرایط حرارتی حاکم بر ارگ بم در بازه زمانی یک‌ساله به صورت دقیق شبیه‌سازی شده است. نوآوری این مطالعه در آن است که برای نخستین بار ارزیابی عملکرد حرارتی یکی از بزرگ‌ترین بناهای خشتی جهان، نه در مقیاس فضاها محدود یا بازه‌های کوتاه‌مدت، بلکه در مقیاسی جامع و با لحاظ جزئیات مصالح سنتی (خشت خام و چوب نخل) صورت گرفته است. تحلیل‌های به دست آمده، علاوه بر ارائه تصویری واقع‌گرایانه از توانمندی‌های نهفته در طراحی اقلیمی ارگ، می‌تواند بستری ارزشمند برای بهره‌برداری از اصول معماری بومی در طراحی ساختمان‌های پایدار معاصر فراهم آورد. در همین راستا، این پژوهش تلاش دارد به سه پرسش کلیدی در زمینه عملکرد انرژی فضاها سنتی با مصالح بومی در اقلیم گرم و خشک پاسخ دهد:

- ۱- آیا فرم و مصالح به کار رفته در معماری سنتی ارگ بم، بدون استفاده از سامانه‌های مکانیکی، قادر به تأمین آسایش حرارتی در اقلیم گرم و خشک هستند؟
- ۲- چه میزان از نوسانات دمایی روزانه و فصلی در فضای داخلی ارگ بم کاهش یافته و این بهینه‌سازی تا چه اندازه به عملکرد مصالح بومی نظیر خشت و چوب خرما وابسته است؟
- ۳- نتایج شبیه‌سازی انرژی با DesignBuilder چه شواهدی

برای تأیید عملکرد غیرفعال و پایدار ساختمان‌های سنتی در کاهش مصرف انرژی ارائه می‌دهد؟

پیشینه پژوهش

مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر، به ویژه در حوزه معماری بومی ایران، نشان می‌دهد که بناهای خشتی در اقلیم‌های گرم و خشک دارای عملکرد حرارتی قابل توجهی هستند که می‌تواند به عنوان الگوی طراحی پایدار مورد استفاده قرار گیرد. در این میان، هرچند مطالعات مستقیم مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی بر روی ارگ بم محدود است، اما پژوهش‌های مرتبط با معماری خشتی ایران و بناهای مشابه از نظر اقلیمی، چارچوب علمی مناسبی برای تحلیل این مجموعه فراهم کرده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که مصالح خشتی به دلیل جرم حرارتی بالا، نقش مهمی در تعدیل دمای داخلی ایفا می‌کنند و می‌توانند با ایجاد تأخیر حرارتی، نوسانات شدید دمایی را کاهش دهند (Oliveti et al, ۲۰۱۴; Asan, ۲۰۰۶). این ویژگی به ویژه در مناطقی مانند بم که دارای دامنه تغییرات دمایی روزانه بالا هستند، موجب بهبود شرایط آسایش حرارتی و کاهش نیاز به انرژی برای سرمایش می‌شود.

علاوه بر مصالح، فرم معماری و سازماندهی فضایی نیز در عملکرد حرارتی این بناها نقش اساسی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که فرم‌های متراکم با نسبت سطح به حجم پایین، باعث کاهش تبادل حرارتی با محیط بیرونی شده و در نتیجه پایداری حرارتی بیشتری را فراهم می‌کنند (Ratti et al, ۲۰۰۳). در پژوهش‌های مرتبط با معماری بومی ایران نیز تأکید شده است که ترکیب فرم، مصالح و اقلیم، یک سیستم همساز و پایدار ایجاد می‌کند که بدون نیاز به سیستم‌های مکانیکی، شرایط آسایش نسبی را فراهم می‌سازد (Foruzanmehr & Vellinga, ۲۰۱۱). این ویژگی‌ها در مجموعه‌هایی مانند ارگ بم که دارای بافتی متراکم، دیوارهای ضخیم و سازمان فضایی درون‌گرا هستند، به وضوح قابل مشاهده است.

از سوی دیگر، نقش تهویه طبیعی در کاهش بار حرارتی ساختمان‌ها در اقلیم‌های گرم و خشک به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از جریان هوای طبیعی، تهویه متقاطع و اختلاف فشار می‌تواند به طور مؤثری دمای داخلی را کاهش دهد و وابستگی به سیستم‌های سرمایشی را کم کند (Santamouris

Asimakopoulou, Hughes et al., ۱۹۹۶, ۲۰۱۲). در معماری سنتی ایران نیز، استفاده از عناصر اقلیمی مانند بادگیر و حیاط مرکزی، این امکان را فراهم می‌کند که هوا به صورت طبیعی در فضاها جریان یافته و شرایط حرارتی بهبود یابد؛ رویکردی که در ساختار فضایی ارگ بم نیز قابل استنباط است.

در حوزه مطالعات پیشرفته‌تر، پژوهش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی نشان داده‌اند که ابزارهایی مانند EnergyPlus و DesignBuilder می‌توانند رفتار حرارتی ساختمان‌ها را با دقت مناسبی تحلیل کرده و نقش عوامل مختلف طراحی را به صورت کمی ارزیابی کنند (Crawley et al., ۲۰۰۱; Attia et al., ۲۰۱۲). با این حال، بررسی ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که در مطالعات مرتبط با بناهای تاریخی ایران و به‌ویژه ارگ بم، استفاده از این روش‌ها بسیار محدود بوده و اغلب تحقیقات به تحلیل‌های کیفی بسنده کرده‌اند. همچنین در بسیاری از این مطالعات، ارزیابی هم‌زمان تأثیر مصالح، فرم و تهویه طبیعی به صورت یکپارچه انجام نشده است.

در مجموع، اگرچه پژوهش‌های پیشین شناخت ارزشمندی از اصول معماری بومی و عملکرد حرارتی مصالح خشتی ارائه داده‌اند، اما خلأ قابل‌توجهی در زمینه تحلیل کمی عملکرد حرارتی بناهای شاخصی مانند ارگ بم وجود دارد. به‌ویژه، فقدان مطالعاتی که با استفاده از داده‌های اقلیمی واقعی و ابزارهای شبیه‌سازی انرژی، شاخص‌هایی مانند دمای عملیاتی و دامنه نوسانات دمایی را بررسی کنند، به‌عنوان یک شکاف پژوهشی مهم قابل طرح است.

بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در این است که با استفاده از شبیه‌سازی انرژی در نرم‌افزار DesignBuilder، عملکرد حرارتی ارگ بم را به صورت کمی و مبتنی بر شرایط واقعی اقلیمی تحلیل می‌کند و از این طریق امکان ارزیابی دقیق شاخص‌هایی مانند بارهای حرارتی، دمای عملیاتی و نوسانات دمایی داخلی را فراهم می‌سازد. این پژوهش همچنین با اتخاذ رویکردی یکپارچه، تأثیر هم‌زمان فرم معماری، مصالح بومی (به‌ویژه خشت) و تهویه طبیعی را بررسی می‌کند؛ رویکردی که در مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تمرکز بر شاخص «پایداری حرارتی داخلی» و کاهش دامنه نوسانات دمایی، از دیگر نوآوری‌های کلیدی این تحقیق محسوب می‌شود که می‌تواند به‌عنوان معیاری دقیق برای سنجش عملکرد معماری غیرفعال در

اقلیم‌های گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، این پژوهش با استخراج اصول عملکردی از یک نمونه شاخص تاریخی، امکان تعمیم این یافته‌ها به طراحی معماری معاصر را فراهم کرده و پلی میان دانش بومی و فناوری‌های نوین در حوزه ساختمان‌های کم‌مصرف ایجاد می‌کند.

### روش پژوهش

در این مطالعه عملکرد انرژی فضاهای داخلی ارگ بم با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و داده‌های اقلیمی شهر بم شبیه‌سازی شده است. تحلیل بارهای حرارتی و تغییرات دمای عملیاتی در فصول مختلف، برای بررسی نقش جرم حرارتی مصالح خشتی، جانمایی فضاها و تهویه طبیعی در ارتقای عملکرد غیرفعال بنا انجام شده است.

### مبانی نظری

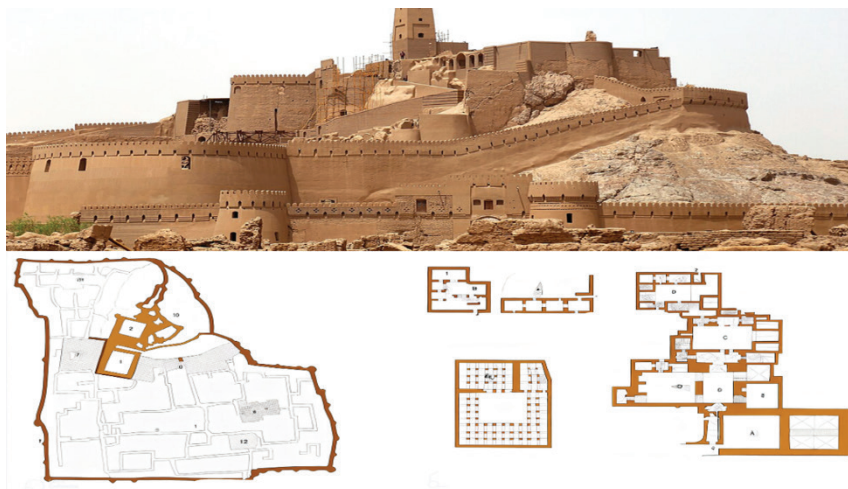
#### ارگ بم از دید معماری

قلعه‌ی بم، به شکل مربع مستطیل با دیوارهایی به بلندی ۶ تا ۷ متر و طول ۱۸۱۵ متر می‌باشد و مساحتی گسترده و حدود ۱۸۰،۰۰۰ مترمربع، یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های خشتی جهان به شمار می‌رود. این دژ عظیم، از بخش‌های متعددی تشکیل شده که هر یک کاربرد خاص خود را داشته‌اند و نشان‌دهنده‌ی زندگی پیچیده و سازمان‌یافته‌ی ساکنان آن در گذشته است. مصالح اصلی که در ساخت ارگ بم به کار رفت، همان‌هایی بودند که طبیعت سخاوتمندانه در اختیار مردمان این سرزمین گذاشته بود: خشت، گل و کاه. این مواد ساده اما کارآمد، به دلیل در دسترس بودن و هماهنگی با شرایط سخت محیطی، انتخاب شدند. (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۱)

معماران چیره‌دست، با به‌کارگیری تکنیک‌های خاص و هنرمندانه، این مصالح را به‌گونه‌ای در هم تنیدند که سازه‌هایی مقاوم و پایدار خلق کنند. دیوارهای ستر و برج‌های بلند، نه تنها به‌عنوان دژی مستحکم در برابر هجوم دشمنان، بلکه به‌عنوان سپری در برابر بادهای تند و سوزان کویری طراحی شده بودند. این معماری هوشمندانه، گواهی بر توانایی و خلاقیت معمارانی است که با کمترین امکانات، بزرگ‌ترین شاهکارها را آفریدند (نیرومند، ۱۴۰۰). مصالح اصلی به‌کاررفته در ساخت قلعه، خشت، گل و کاه بودند. این مواد به‌خاطر شرایط کویری منطقه انتخاب شده

این مجموعه به گونه‌ای طراحی شده که با حداقل استفاده از منابع، بیشترین کارایی اقلیمی و عملکردی را در طول سال فراهم آورد

بودند، چراکه نه تنها در دسترس بودند، بلکه به خوبی با آب و هوای گرم و خشک منطقه سازگاری داشتند. این مصالح، علاوه بر مقاومت بالا، باعث می‌شدند تا قلعه در برابر گرمای سوزان کویر، خنک‌تر باقی بماند (روحی، ۱۳۹۵).  
تصویر ۱ نمای بیرونی ارگ بم به همراه پلان کلی سایت و واحدهای معماری آن را نمایش می‌دهد. سازمان‌دهی فضایی



تصویر ۱- نمای بیرونی ارگ و نقشه‌ها

Figure 1. Exterior view and plans of the Bam Citadel (Source: Author's archive)

**راهبردهای غیرفعال انرژی در معماری بومی ارگ بم**  
معماری بومی ایران، به ویژه در اقلیم گرم و خشک، بر پایه سازوکارهایی شکل گرفته است که بدون نیاز به انرژی فسیلی قادر به تأمین شرایط حرارتی قابل قبول در فضاهای داخلی هستند. این راهبردها شامل بهره‌گیری از جرم حرارتی بالا، سازمان‌دهی هوشمندانه فضاها و استفاده از عناصر تهویه طبیعی است؛ مجموعه‌ای که ستون فقرات پایداری انرژی در معماری سنتی ایران و به‌طور خاص در مجموعه تاریخی ارگ بم را تشکیل می‌دهد. در این بخش، هر یک از این سازوکارها به صورت تحلیلی و با اتکا به پژوهش‌های معتبر مرور می‌شوند تا بنیان نظری لازم برای تحلیل انرژی ارگ بم فراهم گردد.

**۱) نقش جرم حرارتی مصالح خشتی در پایداری انرژی**  
مصالح خشتی که در معماری سنتی مناطق گرم و خشک ایران من جمله بم، فراوان مشاهده می‌شود، دارای ظرفیت حرارتی بالا و ضریب انتقال حرارت پایین هستند؛

معماران قلعه‌ی بم، با به‌کارگیری تکنیک‌های هوشمندانه و خلاقانه، سیستم‌هایی را طراحی کردند که زندگی در دل محیط خشن و بی‌رحم کویر را ممکن ساخت. این نوآوری‌ها، نه تنها پاسخگوی نیازهای اولیه ساکنان بود، بلکه نشان‌دهنده درک عمیق آن‌ها از طبیعت و چگونگی همزیستی با آن است. آن‌ها با شناخت و درکی که از محیط داشتند، از تکنیک‌های هوشمندانه‌ای همچون بادگیرهای بلند، دیوارهای ستر و سایه‌بان‌های گسترده بهره بردند تا در دل گرمای سوزان کویر، فضایی خنک و دل‌نشین خلق کنند. این عناصر معماری، نه تنها همچون جادوگرانی خاموش، دمای داخلی ساختمان‌ها را متعادل و مطبوع می‌ساختند، بلکه با جلوگیری از تبخیر آب، گنجینه‌ی حیات‌بخش این سرزمین خشک را حفظ می‌کردند. این نوآوری‌ها، گواهی بر نبوغ و هزمندهی معماران آن دوران است که با استفاده از کمترین منابع، بیشترین بهره را برده و زندگی را در دل کویر ممکن ساختند (روحی، ۱۳۹۸).

که جهت‌گیری فضاهای اصلی به سمت جنوب-جنوب‌شرقی و استفاده از فضاهای واسط در جبهه‌های گرم‌تر، می‌تواند بار حرارتی کل ساختمان را حدود ۲۵ درصد کاهش دهد. در ارگ بم نیز همین الگو دیده می‌شود؛ بخش‌های خدماتی و کم‌استفاده در جبهه‌های پرتابش قرار گرفته‌اند و فضاهای سکونتی در جهاتی با تابش کنترل‌شده و تهویه مناسب سازمان‌دهی شده‌اند تا سطح آسایش حرارتی به صورت طبیعی تأمین شود. (Christopher, et al, ۲۰۲۱)

### روش تحقیق

فرآیندهای شبیه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها، نخستین بار پس از بحران نفتی دهه ۱۹۷۰ مطرح شدند (Arroyo et al, ۲۰۲۲). در طی دهه‌های اخیر، این فرآیندها در سامانه‌های رایانه‌ای گوناگون پیاده‌سازی شده‌اند و از توانمندی‌های این سیستم‌ها در زمینه‌ی پردازش ریاضی و نمایش‌های گرافیکی بهره گرفته‌اند (Passer et al, ۲۰۲۰). امروزه انواع مختلفی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی ساختمان، چه رایگان و چه تجاری، در دسترس هستند. برای مثال از سال ۱۹۹۶ تاکنون، وزارت انرژی ایالات متحده فهرستی از حدود صد ابزار محاسباتی را گردآوری و نگهداری کرده و در کنار آن، تعدادی نرم‌افزار رایگان نیز توسعه داده است (Zhang & Hong, ۲۰۱۶).

برای واردسازی شرایط اقلیمی در شبیه‌سازی، از فایل آب‌وهوایی معتبر شهر بم با فرمت EPW که از پایگاه رسمی وزارت انرژی ایالات متحده (EnergyPlus Weather Data) دانلود شد، استفاده گردید. این فایل شامل داده‌های ساعتی دما، رطوبت نسبی، تابش خورشید و سرعت باد در طول یک سال کامل است و به‌عنوان منبع اصلی داده‌های اقلیمی در پژوهش حاضر به کار گرفته شد.

به‌منظور بررسی صحت و اعتبار داده‌ها، خروجی‌های این فایل با داده‌های تولیدشده توسط نرم‌افزار Meteonorm مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان داد که روند تغییرات دما و تابش خورشید در هر دو مجموعه داده مشابه بوده و اختلاف‌ها در محدوده قابل قبول قرار دارند. بنابراین، فایل EnergyPlus به‌عنوان داده اصلی در شبیه‌سازی استفاده شد و داده‌های Meteonorm صرفاً نقش مکمل و ابزار اعتبارسنجی را ایفا کردند

سناریوهای متعددی شامل تغییر در بارهای داخلی، تهویه طبیعی، و استفاده یا عدم استفاده از سایه‌اندازها

ویژگی‌هایی که آن‌ها را به یکی از مهم‌ترین عناصر در تعدیل نوسانات دمایی تبدیل کرده است. دیوارهای ضخیم خشتی با جذب گرمای روز و آزادسازی تدریجی آن در ساعات شب، امکان ایجاد یک محیط پایدار حرارتی را فراهم می‌کنند. نتایج پژوهش «آل‌فارو و همکاران» (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که دیوارهای خشتی با ضخامت ۴۵ تا ۶۰ سانتی‌متر قادرند دامنه نوسان دمای داخلی را تا ۵۵ درصد کاهش دهند و این امر مستقیماً نیاز به سرمایه‌ش مکانیکی را کاهش می‌دهد. (Alfaro, et al, ۲۰۱۹)

افزون بر این، مصالح خشتی موجب ایجاد «تأخیر حرارتی» می‌شوند؛ به این معنا که حرارت اوج روز با چندین ساعت تأخیر وارد فضای داخلی می‌شود. این تأخیر که گاهی تا ۸ تا ۱۰ ساعت ثبت شده است، باعث می‌شود گرمای شدید ظهر در ساعات خنک‌تر عصر یا شب وارد ساختمان شود و در نتیجه بار سرمایشی به شکل چشمگیری کاهش یابد. پژوهش «خوانگ و همکاران» (۲۰۲۰) نشان می‌دهد که مواد با جرم حرارتی بالا، نه تنها دما را تعدیل، بلکه کارایی تهویه طبیعی را نیز افزایش می‌دهند زیرا جریان هوای شبانه در ترکیب با سطح خنک‌شده مصالح عملکرد مطلوب‌تری دارد. این سازوکار در ارگ بم نیز به‌وضوح مشاهده می‌شود؛ جایی که ضخامت زیاد دیوارها و استفاده از خشت خام به حفظ پایایی حرارتی کمک کرده است. (Huang, et al, ۲۰۲۰)

### ۲) تأثیر جامایی و سازمان‌دهی فضاها بر عملکرد انرژی

سازمان‌دهی فضایی در معماری بومی ایران، پاسخی هوشمندانه به الگوهای تابش و گردش باد در اقلیم گرم و خشک بوده است. حیاط مرکزی، یکی از کلیدی‌ترین الگوهای فضایی، با ایجاد سایه گسترده، سطوح زیاد تبادل حرارتی شبانه، و امکان تهویه بهتر، به میزان قابل توجهی دمای داخلی را کاهش می‌دهد. مطالعه «فرانسیسکو و همکاران» (۲۰۱۸) نشان می‌دهد که الگوی حیاط مرکزی می‌تواند میانگین دمای داخلی ساختمان را در تابستان ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد و این ویژگی در ساختارهای سنتی ایران همچون ارگ بم به‌خوبی قابل مشاهده است. (Francisco, et al, ۲۰۱۸)

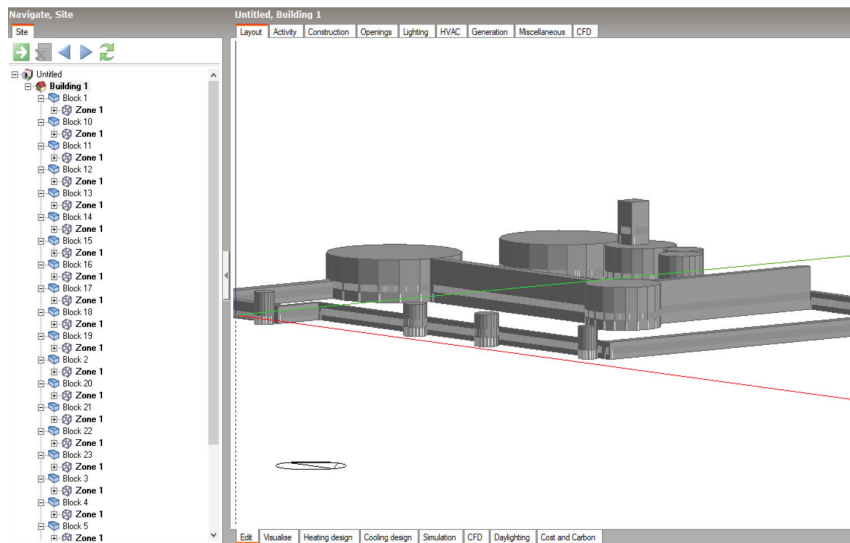
جامایی فضاها نسبت به تابش و جهت باد نیز یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های طراحی غیرفعال در معماری سنتی بوده است. پژوهش «کریستوفر و همکاران» (۲۰۲۱) نشان داده

در تصویر ۲ می‌بینید فضاهاى مختلف شامل بخش‌هاى مسكونى، نیمه‌باز و باز به‌صورت تفکیک‌شده تعریف شدند تا پاسخ حرارتى دقیق‌تری از هر بخش به دست آید. این زون‌بندى امکان تحلیل جداگانه رفتار حرارتى هر بخش و مقایسه آن‌ها را فراهم می‌کند.

برای تحلیل رفتار حرارتى فضا در طول سال طراحی و اجرا شد (Wasilowski et al., ۲۰۰۹)

### ۱- مدل‌سازی هندسى و زون‌بندى

هندسه‌ی ارگ بم بر اساس پلان‌هاى مستند و منابع تاریخی در محیط سه‌بعدى نرم‌افزار بازسازی شد. همان‌طور که



تصویر ۲- زون‌بندى ارگ بم (ترسیم: نگارنده)

Figure 2. Zoning of the Bam Citadel (Source: Author)

دماى داخلی می‌شود، درحالی‌که چوب نخل در سقف‌ها با رسانایی پایین نقش مؤثرى در کاهش انتقال حرارت دارد. مشخصات فیزیکی و ترمال این مصالح در جدول ۱ ارائه شده است و مبنای شبیه‌سازی قرار گرفت

۲- تعریف مصالح سنتى مصالح بومی شامل خشت خام و چوب نخل با ویژگی‌هاى حرارتى مشخص وارد مدل شدند. خشت خام با ظرفیت گرمایی بالا و هدایت حرارتى پایین موجب کاهش نوسانات

جدول ۱- ویژگی‌هاى حرارتى مصالح

Table 1. Thermal properties of materials

cm	حدود ۴۰ الی ۶۰	ضخامت دیوار خشتى
W/mK	۰,۷۵	ضریب هدایت حرارتى خشت
J/KgK	۱۰۰۰	ظرفیت گرمایی ویژه خشت
$۳^{\wedge}Kg/m$	۱۸۰۰	دانسیته خشت خام

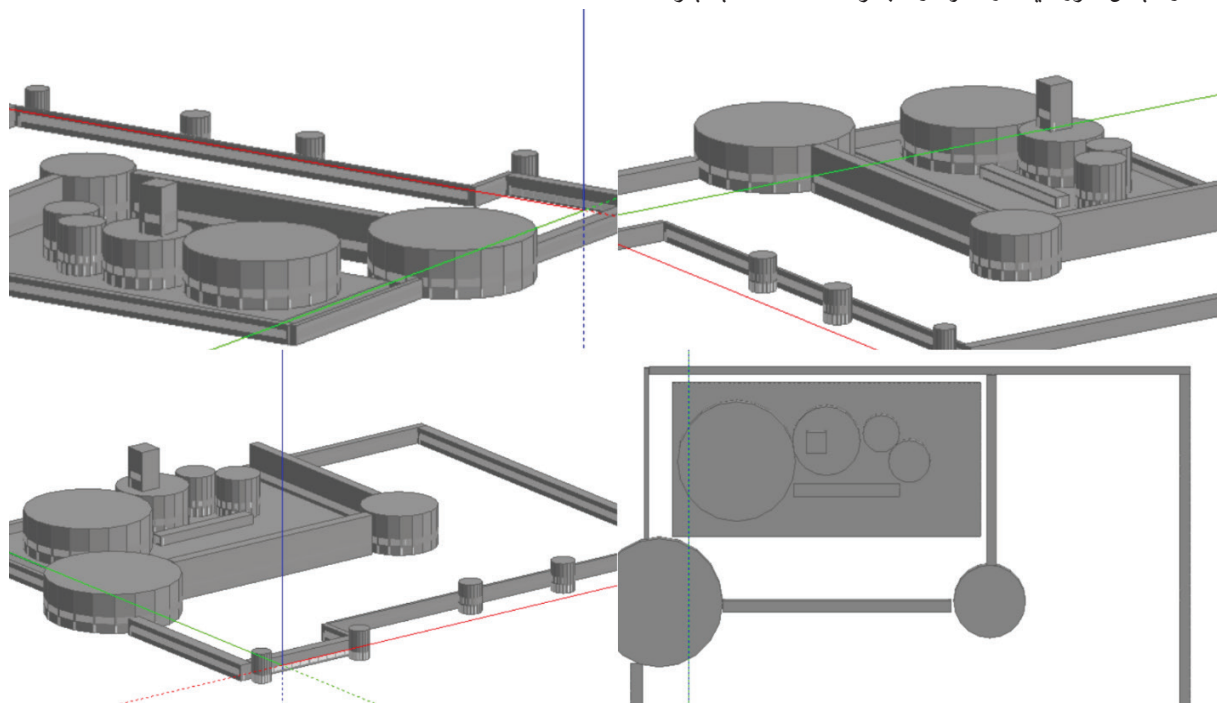
### ۳- داده‌های اقلیمی و شرایط مرزی

و اختلاف‌ها در محدوده قابل قبول قرار دارند. بنابراین، فایل EnergyPlus به‌عنوان داده اصلی در شبیه‌سازی استفاده شد و داده‌های Meteornorm صرفاً نقش مکمل و ابزار اعتبارسنجی را ایفا کردند.

در سناریوی بهره‌برداری، فرض شد بنا فاقد سیستم‌های مکانیکی گرمایش و سرمایش بوده و تنها اثرات تهویه طبیعی، جرم حرارتی مصالح و تبادل حرارتی با محیط بیرونی موردبررسی قرار گرفت همچنین در تصویر ۳ ناهای مختلف از شبیه‌سازی ارگ بم در نرم‌افزار دیزاین بیلدر را مشاهده می‌کنیم.

برای واردسازی شرایط اقلیمی در شبیه‌سازی، از فایل آب‌وهوایی معتبر شهر بم با فرمت EPW که از پایگاه رسمی وزارت انرژی ایالات متحده دریافت شد، استفاده گردید. این فایل شامل داده‌های ساعتی دما، رطوبت نسبی، تابش خورشید و سرعت باد در طول یک سال کامل است و به‌عنوان منبع اصلی داده‌های اقلیمی پژوهش حاضر به کار گرفته شد.

به‌منظور بررسی صحت داده‌ها، خروجی‌های این فایل با داده‌های تولیدشده توسط نرم‌افزار Meteornorm مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان داد که روند تغییرات دما و تابش خورشید در هر دو مجموعه داده مشابه بوده



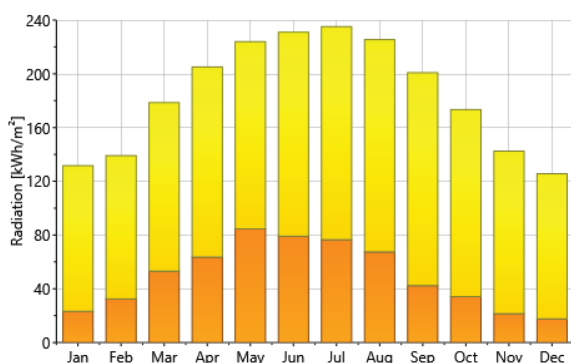
تصویر ۳- ناهای مختلف از شبیه‌سازی ارگ بم

Figure 3. Different views of the Bam Citadel simulation (Source: Author's archive)

و جهت باد، فشار هوا و دمای آسمان در طی یک سال اقلیمی نمونه برای منطقه بم است. نرم‌افزار Meteornorm با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی محلی و مدل‌های میان‌بایی پیشرفته، توانست شرایط جوی خاص اقلیم گرم و خشک منطقه را به درستی بازسازی کند. با وارد کردن این فایل در محیط نرم‌افزار DesignBuilder، امکان تطبیق رفتار حرارتی بنا با شرایط واقعی اقلیمی فراهم گردید. تحلیل اولیه داده‌ها نشان‌دهنده نوسانات شدید

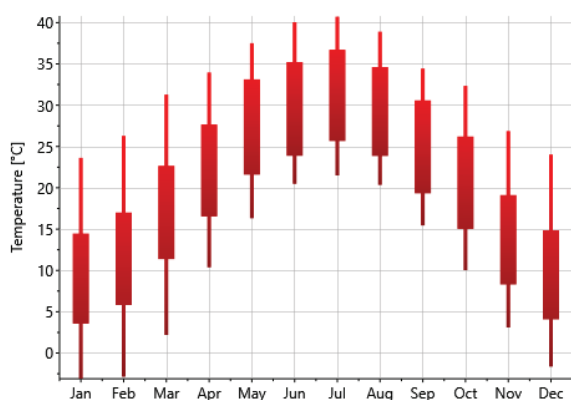
### ۴- جمع‌آوری و تحلیل داده‌های اقلیمی

به‌منظور شبیه‌سازی دقیق شرایط حرارتی ارگ بم و بررسی رفتار انرژی آن در طول سال، داده‌های اقلیمی معتبر و متناسب با موقعیت جغرافیایی شهر بم گردآوری شد. برای این منظور، از فایل آب‌وهوایی استاندارد با فرمت EPW که از طریق نرم‌افزار Meteornorm استخراج شده بود، استفاده گردید. این فایل شامل اطلاعات دقیق ساعتی از جمله دمای خشک هوا، رطوبت نسبی، شدت تابش خورشیدی، سرعت



نمودار ۲- میانگین تابش (منبع: نرم افزار Meteonorm)  
Chart 2. Average radiation intensity (Source: Meteonorm software)

نمودار ۲ تابش خورشیدی ماهانه را به تفکیک تابش مستقیم (Direct) و تابش منتشرشده (Diffuse) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ماه‌های تابستانی (می تا آگوست) تابش مستقیم سهم عمده‌ای از تابش کل را تشکیل می‌دهد، در حالی که در ماه‌های زمستانی، سهم تابش منتشرشده افزایش می‌یابد. این ویژگی اهمیت زیادی در تحلیل زاویه‌های تابش، طراحی سایه‌بان‌ها و استفاده از نور طبیعی منتشر برای کاهش مصرف انرژی روشنایی در فصول سرد دارد. همچنین باید توجه داشت که در زمستان، گرچه مقدار کل تابش کم است، اما تابش منتشرشده (diffuse) می‌تواند فرصت مناسبی برای تأمین روشنایی طبیعی در فضاهای داخلی بدون ایجاد بار سرمایشی اضافی فراهم آورد.



نمودار ۳- میانگین دمای هوای ماهانه (منبع: نرم افزار Meteonorm)  
Chart 3. Average monthly air temperature (Source: Meteonorm software)

دمایی بین روز و شب، میانگین تابش بالای خورشیدی در فصول گرم، و رطوبت نسبی پایین در بیشتر روزهای سال است؛ عواملی که همگی در طراحی اقلیمی سنتی سازه‌های گلی مانند ارگ بم لحاظ شده‌اند. این داده‌ها نه تنها مبنای شبیه‌سازی انرژی قرار گرفتند، بلکه در تفسیر نتایج و تحلیل عملکرد ترموفیزیکی مصالح بومی نیز نقش محوری داشتند.

#### ۴-۱ نمودارهای اقلیمی کلیدی



نمودار ۱- میانگین تابش خورشیدی

نمودار ۱ نمودار ساعتی تابش خورشیدی نشان می‌دهد که حداکثر شدت تابش در ماه‌های خرداد تا مرداد رخ می‌دهد و در این بازه، سطح انرژی دریافتی از خورشید به بیش از ۸ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز می‌رسد. با این حال، آنچه که کمتر مورد توجه قرار گرفته اما اهمیت بالایی در طراحی دارد، مقادیر حداقلی تابش در فصل زمستان است؛ به‌ویژه در ماه‌های دسامبر و ژانویه که مقدار تابش خورشیدی به کمتر از ۲ کیلووات ساعت بر مترمربع در روز می‌رسد. کاهش قابل توجه تابش در فصل‌های پاییز و زمستان به‌ویژه در دی و بهمن، تأکید دارد که عملکرد حرارتی غیرفعال بنا در این ماه‌ها نیازمند مداخلات مکمل گرمایشی است. این اطلاعات برای تحلیل ظرفیت بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در طراحی غیرفعال بسیار حیاتی است.

## ۵- نتایج و داده‌ها

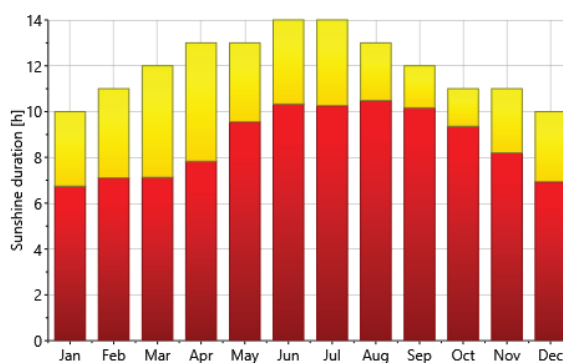
در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی انرژی ساختمان ارگ بم که با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و موتور شبیه‌ساز EnergyPlus انجام شده است، ارائه و تحلیل می‌گردد. هدف شبیه‌سازی‌ها ارزیابی عملکرد حرارتی این بنای تاریخی در اقلیم گرم و خشک شهر بم بوده است تا مشخص شود که آیا شرایط داخلی بنا در دوره‌های زمانی مختلف، به‌ویژه در فصل سرد سال، پاسخگوی آسایش حرارتی ساکنان بوده است یا خیر.

داده‌های ورودی شامل ویژگی‌های فیزیکی مصالح اصلی (نظیر خشت و چوب خرما)، حجم‌ها و هندسه‌ی فضاها، و همچنین فایل اقلیمی معتبر شهر بم با فرمت EPW بوده‌اند که از پایگاه رسمی EnergyPlus دریافت شد. برای افزایش قابلیت اعتماد، داده‌های این فایل با خروجی‌های نرم‌افزار Meteornorm مقایسه شدند؛ داده‌های Meteornorm صرفاً نقش مکمل و ابزار اعتبارسنجی را ایفا کردند و منبع اصلی داده‌ها همان فایل معتبر EnergyPlus بوده است.

پس از مدل‌سازی سه‌بعدی بنا، تحلیل‌ها در بازه‌ی زمانی یک سال کامل (ژانویه تا دسامبر ۲۰۰۲) انجام شدند و نمودارهای خروجی بر اساس بازه زمانی روزانه (Daily Interval) استخراج گردیدند. این نمودارها شامل مصرف انرژی، دمای داخلی، انتقال حرارت، نرخ تهویه و بارهای حرارتی سیستم هستند. داده‌های خام خروجی از DesignBuilder برای ارتقاء کیفیت بصری و وضوح بیشتر به نرم‌افزار Tecplot منتقل شده و نمودارها در محیط این نرم‌افزار بازطراحی و زیباسازی شدند.

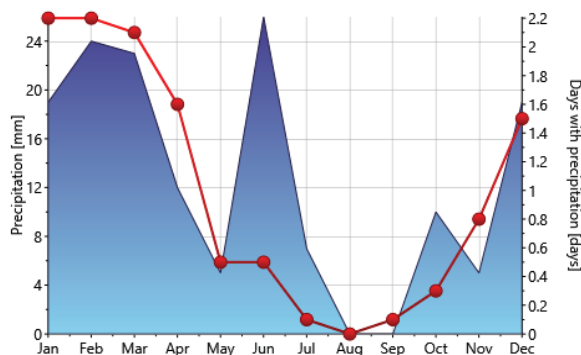
بررسی این نمودارها دیدگاه دقیقی نسبت به عملکرد ترموفیزیکی ارگ بم ارائه می‌دهد و به درک بهتر از تأثیر نوع مصالح، هندسه‌ی فضاها و شرایط اقلیمی بر رفتار حرارتی ساختمان کمک می‌کند. در ادامه، هر نمودار به تفکیک ارائه شده و مورد تحلیل و تفسیر قرار خواهد گرفت.

همان‌طور که در نمودار ۳ مشهود است، دمای متوسط ماهانه از حدود ۱۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. اختلاف زیاد دمای شب و روز در ماه‌های گرم نشانگر تأثیر بالای جرم حرارتی مصالح در حفظ آسایش حرارتی است



نمودار ۴- میانگین مدت زمان تابش آفتاب (منبع: نرم‌افزار Meteornorm)  
Chart 4: Average Radiation Time (Source: Meteornorm software)

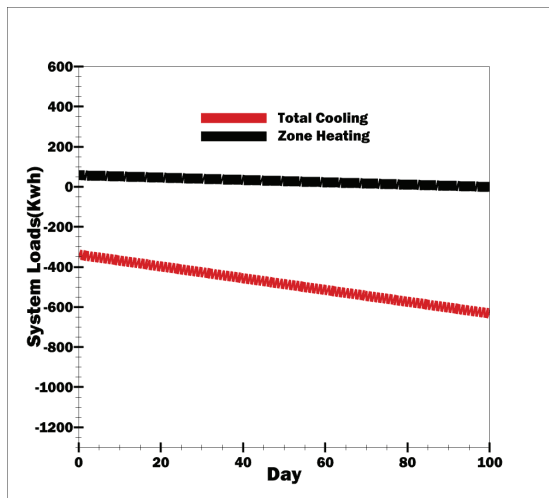
بازه‌ی تابش روزانه بین ۸ تا ۱۳ ساعت متغیر است که در ماه‌های تابستانی به اوج می‌رسد. این موضوع پتانسیل بهره‌گیری از تهویه طبیعی و کنترل تابش را در نمودار ۴ نشان می‌دهد.



نمودار ۵- میزان بارندگی (منبع: نرم‌افزار Meteornorm)  
Chart 5: Precipitation rate (Source: Meteornorm software)

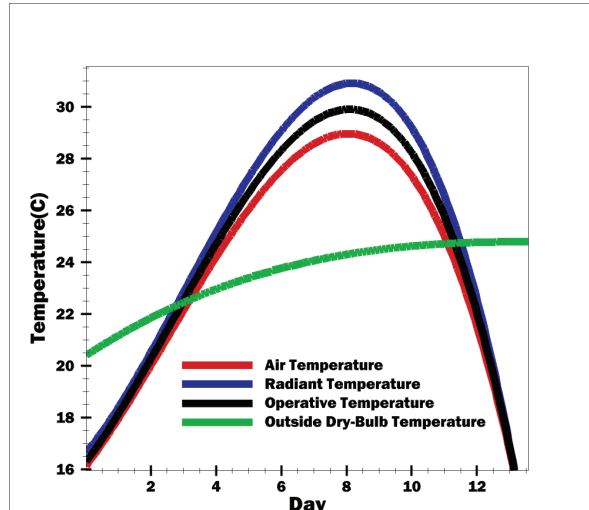
نمودار ۵ الگوی بارندگی، با بیشینه در بهمن و فروردین و کمینه در تابستان، نشان‌دهنده اقلیم گرم و نیمه‌خشک است. تعداد روزهای بارانی در زمستان بیشتر بوده که بر تهویه و رطوبت داخلی مؤثر است.

نمودار نشان می‌دهد که در طول ۳۰ روز، سهم نفوذ هوا و گرمایش محسوس منطقه‌ای تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین بار سرمایش محسوس نیز تغییرات اندکی دارد. این موضوع بیانگر پایداری بار حرارتی در فصل زمستان و نیاز به طراحی عایق‌بندی مؤثر جهت جلوگیری از اتلاف انرژی است.



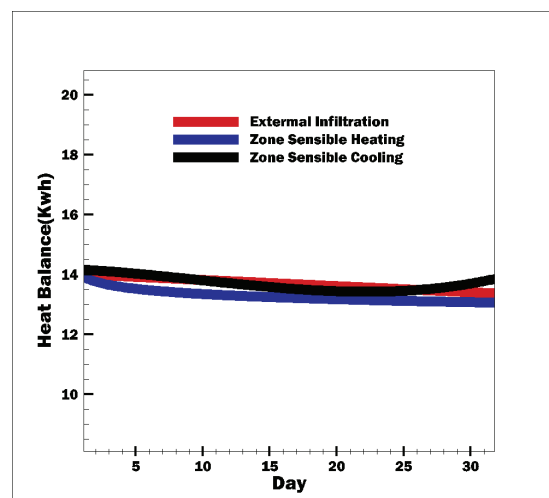
نمودار ۸- رفتار هم‌زمان گرمایش و سرمایش در طول سال  
Chart 8. Simultaneous heating and cooling behavior throughout the year (Source: Meteonorm software)

در این نمودار روند تغییرات بار سرمایش و گرمایش منطقه‌ای در طول ۱۰۰ روز نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که بار سرمایش در طول زمان کاهش و بار گرمایش تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه در کاهش بار سرمایشی با بهره‌گیری از تکنیک‌های بهینه‌سازی طراحی است.



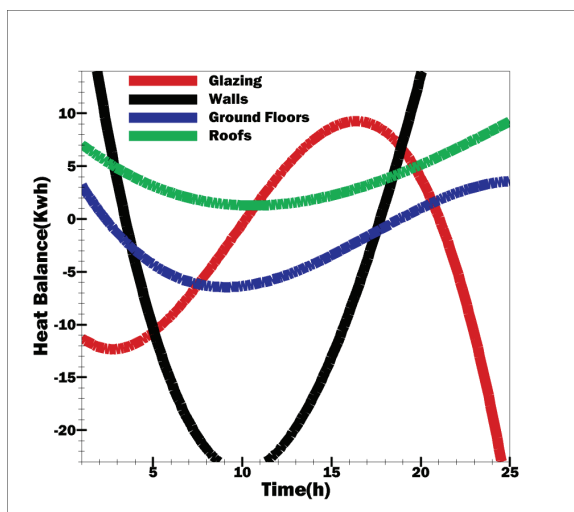
نمودار ۶- تحلیل پارامترهای دمایی در فرآیند شبیه‌سازی انرژی  
Chart 6. Analysis of thermal parameters in the energy simulation process (Source: Meteonorm software)

این نمودار روند تغییرات دمای هوا، دمای تابشی، عملیاتی و دمای خشک محیط بیرونی را در بازه‌ای از روز نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای تابشی و عملیاتی در فضای داخلی نوسان بیشتری نسبت به دمای هوا دارند، و این نشان‌دهنده تأثیرات مستقیم تابش خورشیدی و تبادل حرارتی بین سطوح داخلی است. همچنین دمای داخل در بازه‌ای از روز به حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که برای آسایش حرارتی بالا تلقی می‌شود.



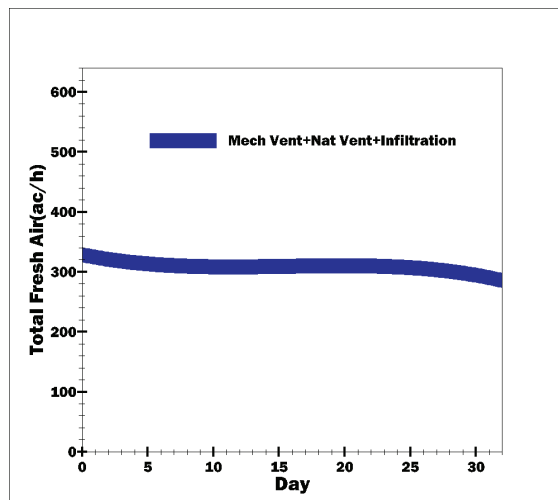
نمودار ۷- توازن حرارتی روزانه در فصل زمستان  
Chart 7. Daily thermal balance during winter (Source: Meteonorm software)

در این نمودار سه نوع دما شامل دمای هوا، دمای تابشی و دمای عملیاتی در طول یک شبانه‌روز بررسی شده‌اند. دمای عملیاتی میانگینی از دمای تابشی و هوای داخل است و بهترین شاخص برای تحلیل آسایش حرارتی ساکنین محسوب می‌شود. مشاهده می‌شود که دمای هوای داخلی تا حدود ۳۰ درجه افزایش یافته که می‌تواند باعث تنش حرارتی شود.



نمودار ۱۱- بررسی سهم سطوح در توازن حرارتی ساختمان  
Chart 11. Evaluation of surface contributions to the building thermal balance (Source: Author)

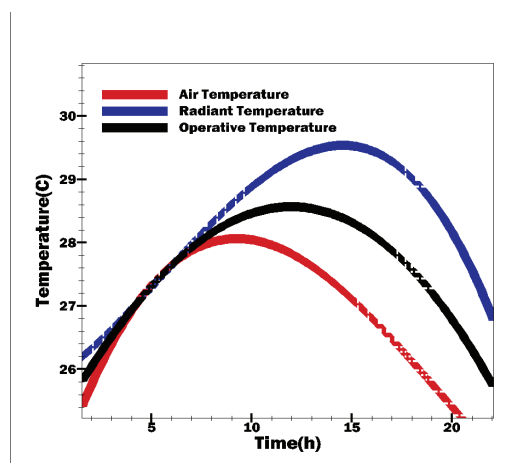
نمودار نشان می‌دهد که کف، دیوارها و سقف به صورت جداگانه در تبادل حرارتی نقش دارند. سقف و دیوارها بیشترین سهم را در انتقال حرارت دارند، که نشان‌دهنده نیاز به عایق‌بندی مؤثر این عناصر است. کف ساختمان نیز گرچه اثر کمتری دارد، اما در تعادل کلی بی‌تأثیر نیست.



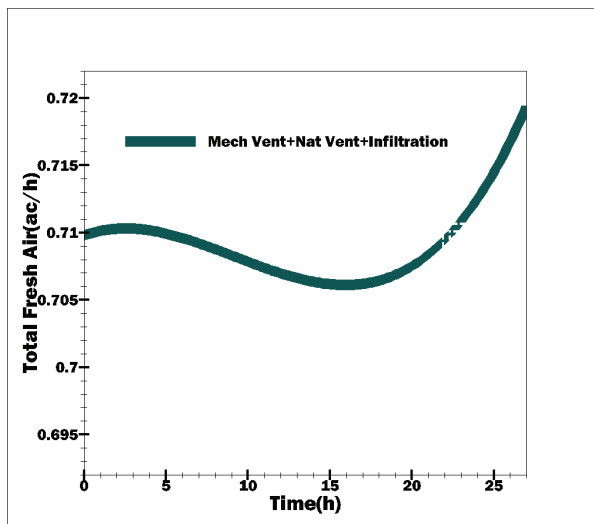
نمودار ۹- نرخ تأمین هوای تازه و بررسی الگوی تهویه  
Chart 9. Fresh air supply rate and ventilation pattern analysis (Source: Meteonorm software)

نمودار میزان هوای تازه ورودی حاصل از تهویه طبیعی، مکانیکی و نفوذ هوا را در طول یک ماه نشان می‌دهد. علی‌رغم نوسانات اندک، مقدار کلی جریان ورودی تقریباً پایدار باقی مانده است که به کارایی مناسب تهویه طبیعی اشاره دارد. این موضوع برای شرایط اقلیم گرم و خشک حائز اهمیت است.

۱-۵ تحلیل عملکرد حرارتی در روز تابستانی (۱۵ ژوئن)  
در این نمودار، رفتار حرارتی بنا در تاریخ ۱۵ ژوئن (اواخر خرداد)، که یکی از روزهای نمونه‌ی فصل گرم محسوب می‌شود، به صورت زیرساعتی مورد بررسی قرار گرفته است.



نمودار ۱۰- مقایسه دمای هوا، تابشی و مؤثر در فضای داخلی  
Chart 10. Comparison of air, radiant, and operative temperatures in indoor spaces (Source: Meteonorm software)



نمودار ۱۳- تحلیل نرخ جریان هوای تازه در یک شبانه‌روز  
Chart 13. Analysis of fresh air flow rate over a 24-hour period (Source: Author)

میزان کل هوای تازه ورودی در بازه زمانی یک شبانه‌روز نشان داده شده است. این نمودار نوسانات تهویه را در طول روز مشخص کرده و بر اهمیت استفاده به‌جا از تهویه طبیعی در طراحی ساختمان تأکید دارد.

#### ۲-۵ تحلیل جزئی تلفات حرارتی و نیاز گرمایشی در شرایط زمستانی

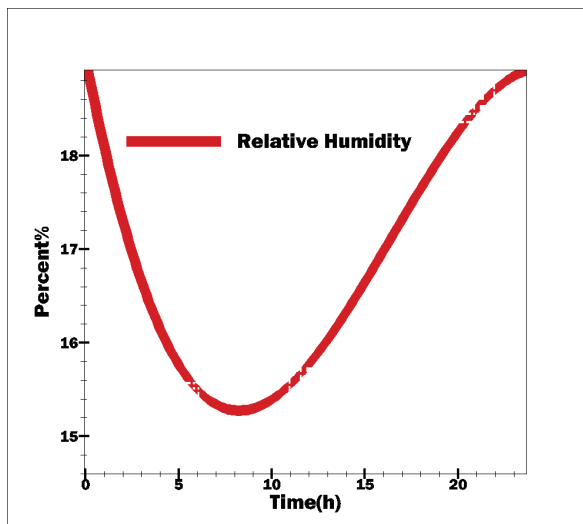
جدول ۲- خروجی شبیه‌سازی انرژی

Table 2. Energy simulation outputs (Source: Author)

Air Temperature (°C)	21.00
Radiant Temperature (°C)	16.40
Operative Temperature (°C)	18.70
Outside Dry-Bulb Temperature (°C)	-7.10
Glazing (kW)	-572.62
Walls (kW)	-365.30
Ceilings (int) (kW)	-27.25
Floors (int) (kW)	27.36
Ground Floors (kW)	8.55
Partitions (int) (kW)	0.16
Roofs (kW)	-302.67
External Infiltration (kW)	-1601.48
External Vent. (kW)	-127.67
Zone Sensible Heating (kW)	2961.62

درجه سلسیوس است که نسبت به دمای هوا پایین‌تر است و نشان‌دهنده‌ی سردی سطوح محیطی مانند دیوارها و کف می‌باشد.

دمای عملیاتی (Operative Temperature) میانگینی از دمای هوا و تابشی است و برابر با ۱۸.۷ درجه سلسیوس است که مرز پایین منطقه آسایش را نشان



نمودار ۱۲- تغییرات رطوبت نسبی در طول زمستان  
Chart 12. Relative humidity variations during winter (Source: Author)

نمودار نشان می‌دهد که در ساعات ابتدایی روز، رطوبت نسبی پایین‌ترین مقدار را دارد و به تدریج افزایش می‌یابد. این تغییرات در شرایط اقلیم گرم و خشک اهمیت زیادی دارد زیرا کاهش شدید رطوبت می‌تواند باعث ناراحتی حرارتی شود

در این بخش، مقادیر دمایی مختلف مرتبط با آسایش حرارتی فضا بررسی شده:

- دمای هوا (Air Temperature) برابر با ۲۱ درجه سلسیوس است که در محدوده‌ی قابل‌قبول برای آسایش حرارتی قرار دارد.
- دمای تابشی (Radiant Temperature) برابر با ۱۶.۴

باید اولویت اول برای بهبود باشد (مثلاً تعویض درها، درزگیرها، پنجره‌های مناسب و تقویت عایق‌بندی درها).

• External Ventilation (تهویه) تهویه مکانیکی یا طبیعی باعث تلفات حرارتی حدود ۱۲۷ کیلوواتی شده. درحالی‌که تهویه برای سلامت محیط لازم است، اما در فصول سرد باید به‌صورت کنترل‌شده انجام شود (مثلاً با مبدل حرارتی بازیاب انرژی).

• Zone Sensible Heating (گرمایش محسوس) برای جبران تلفات فوق، سیستم گرمایشی باید تقریباً ۳ مگاوات انرژی حرارتی تأمین کند. این مقدار بسیار بالاست و نشان می‌دهد که ساختمان در وضعیت فعلی کاملاً وابسته به سیستم گرمایشی است و بدون آن امکان تأمین آسایش وجود ندارد.

### نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی حاضر با بهره‌گیری از شبیه‌سازی انرژی ساختمان در نرم‌افزار DesignBuilder به بررسی شرایط آسایش حرارتی و مصرف انرژی در ارگ بم، به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از معماری سنتی در اقلیم گرم و خشک ایران، پرداخت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مصالح بومی چون خشت و چوب نخل، همراه با طراحی فضایی مناسب، در تنظیم دمای داخلی و کاهش بار سرمایشی نقش قابل‌توجهی دارند.

نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که هرچند مصالح بومی ارگ بم (خشت خام و چوب نخل) به‌تنهایی قادر به تأمین کامل شرایط آسایش حرارتی مطابق با استانداردهای بین‌المللی نیستند، اما نقش مهمی در کاهش نوسانات دمایی داخلی و کاهش بارهای سرمایش و گرمایش ایفا می‌کنند. بنابراین، این مصالح را باید به‌عنوان بخشی از راهکارهای اقلیمی مؤثر در بهبود کارایی انرژی ساختمان‌های سنتی و الهام‌بخش طراحی پایدار معاصر در نظر گرفت.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی معماری ارگ بم، متکی بر مصالح بومی نظیر خشت خام و چوب خرما و فرم فشرده‌ی هندسی، توانسته در غیاب سیستم‌های مکانیکی فعال، سطح قابل‌قبولی از آسایش حرارتی را در فصول گرم سال فراهم آورد. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار DesignBuilder گویای آن است که دمای هوای داخلی در بسیاری از مواقع در بازه‌ی آسایش

می‌دهد.

• دمای خشک بیرون (Outside Dry-Bulb Temperature) برابر با ۷٫۱- درجه سلسیوس است، که اختلاف دمای قابل‌توجهی با فضای داخلی دارد و منجر به تلفات حرارتی زیاد از پوسته‌ی ساختمان می‌شود.

• Glazing (پنجره‌ها) پنجره‌ها تلفات حرارتی بالایی دارند. مقدار ۵۷۲- کیلووات نشان می‌دهد که عایق حرارتی شیشه‌ها ناکافی است. برای کاهش این تلفات، استفاده از پنجره‌های دوجداره یا شیشه‌های با پوشش کم‌گسیل (low-e) پیشنهاد می‌شود.

• Walls (دیوارها) دیوارها نیز سهم قابل‌توجهی از تلفات حرارتی دارند. این میزان منفی نشان‌دهنده‌ی عایق ناکافی در مصالح دیوار (مثل خشت خام) است. استفاده از لایه‌های عایق داخلی یا خارجی می‌تواند مؤثر باشد.

• Ceilings (سقف) سقف تقریباً هیچ‌گونه تلفات یا دریافت حرارتی قابل‌توجهی ندارد. این ممکن است به دلیل ساختار سقف یا وجود پوشش مناسب (مثل عایق یا بام سنتی ضخیم) باشد.

• Floors (کف) کف مقدار کمی گرما وارد فضا می‌کند. این نشان می‌دهد که انتقال حرارت از کف به داخل انجام می‌شود که در فصل سرد می‌تواند کمک‌کننده باشد. البته این مقدار نسبتاً ناچیز است.

• Ground Floors کف هم‌سطح با زمین نیز اندکی گرما وارد فضا کرده است. این ممکن است به دلیل تبادل حرارتی با زمین باشد، که در اقلیم سرد یک مزیت جزئی محسوب می‌شود.

• Partitions (دیوارهای داخلی) تبادل حرارتی بین فضاهای داخلی بسیار ناچیز بوده، که طبیعی است و نشان می‌دهد فضاهای داخلی دمایی تقریباً یکسان دارند.

• Roofs (سقف بیرونی) سقف خارجی نیز تلفات حرارتی دارد. مقدار ۳۰۰- کیلووات قابل‌توجه است و نشان می‌دهد که عایق‌کاری سقف کافی نیست و بخشی از گرمای داخل به‌راحتی از طریق سقف از بین می‌رود.

• External Infiltration (نفوذ هوا) بزرگ‌ترین منبع تلفات انرژی در این مدل است. عدد منفی ۱۶۰۰ کیلووات بسیار بالاست و بیانگر نفوذ زیاد هوای سرد از درزها و شکاف‌های در و پنجره‌ها است. این مورد

تعریف شده توسط استانداردهای بین‌المللی قرار دارد، در حالی که نوسانات دمایی شدید اقلیم گرم و خشک شهر بم تا حد زیادی در داخل بنا تعدیل شده است. این عملکرد حرارتی مطلوب، به‌ویژه در ساعات اوج گرما، نشان می‌دهد که معماری سنتی ایران به‌صورت هوشمندانه‌ای با اقلیم سازگار شده است. از سوی دیگر، تحلیل دینامیکی انرژی مصرفی نشان داد که نیاز به سرمایش مکانیکی به‌طور چشمگیری کاهش یافته، که این خود

بیانگر ظرفیت بالای راهکارهای غیرفعال در کنترل انرژی است. در نهایت، این تحقیق با ارائه‌ی شواهد کمی شده از عملکرد حرارتی بنای سنتی، جایگاه علمی تحلیل انرژی در معماری تاریخی را تقویت کرده و مسیر را برای مطالعات تطبیقی مشابه در سایر بافت‌های سنتی هموار می‌سازد

عزیزی، م. بندارآبادی، ح.، و حاجی صادقی، ن. (۱۴۰۱). فرهنگ لرزه‌خیزی محلی در معماری بومی ایران: شواهدی از معماری خشتی یزد. میراث ساخته‌شده (Built Heritage)، نیرومند، ه.، و همکاران. (۱۴۰۰). مرور سیستماتیک بر دیوارهای خشتی (چینه). مکانیک خاک و مهندسی پی، ۴۵۸، (۴)، ۳۰۱-۲۹۵. روانخواه، م.، و همکاران. (۱۳۹۶). ادغام میراث فرهنگی در مدیریت ریسک سوانح: چالش‌ها و فرصت‌ها برای افزایش تاب‌آوری در برابر سوانح. فراتر از انتظار: دیدگاه‌هایی در مطالعات پایداری میراث فرهنگی، ۲، ۳۰۷-۳۲۱. روحی، ج. (۱۳۹۸). تأثیر عوامل فرهنگی و محیطی بر گونه‌شناسی معماری ارگ بم. روحی، ج.، و آویتا، بی. جی. ام. آ. (۱۳۹۵). مسائل و اهمیت‌های یک منظر فرهنگی بازسازی‌شده: مطالعه موردی بم و منظر فرهنگی آن. در چهارمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.

Alfaro, S., Aguilar, R., & Pando, M. (2019). Thermal behavior of adobe walls in hot-dry climates. *Energy and Buildings*, 199, 134–144.

Andaroodi, E., Ono, K., & Kitamoto, A. (2008). Metadata-based knowledge management for Bam heritage. In VSMM Conference.

Arroyo, J., Spiessens, F., & Helsen, L. (2022). Comparison of optimal control techniques for building energy management. *Frontiers in Built Environment*, 8, 849754.

Asan, H. (2006). Numerical computation of time lag and decrement factor for different building materials. *Building and Environment*, 41(5), 615–620. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020>

Attia, S., Evrard, A., & Gratia, E. (2012). Development of benchmark models for the Egyptian residential buildings sector. *Applied Energy*, 94, 270–284. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.065>

Azizi-Bondarabadi, H., & Haji Sadeghi, N. (2022). Local seismic culture in Iranian vernacular architecture: Evidence from Yazd earthen architecture. *Built Heritage*, 5, (1)6.

Bailly, G. C., et al. (2024). Advancing earth-based construction: A comprehensive review of stabilization and reinforcement techniques for adobe and compressed earth blocks. *Eng*, 783–750, (2)5.

Bam and Arg-e-Bam, I. (n.d.). <https://dev.earth-auroville.com/bam-arg-e-bam-iran>

Carrobé, A., Rincón, L., & Martorell, I. (2021). Thermal monitoring and simulation of earthen buildings: A review. *Energies*, 2080, (8)14.

Christopher, A., Rahman, M., & Hassan, A. (2021). Orientation-based passive design strategies in traditional Middle Eastern architecture. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103045.

Crawley, D. B., et al. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 331–319, (4)33. [https://doi.org/10.1016/S-0378-6-00114\(00\)7788](https://doi.org/10.1016/S-0378-6-00114(00)7788)

- Foruzanmehr, A., & Vellinga, M. (2011). Vernacular architecture: Questions of comfort and practicability. *Building Research & Information*, 285–274 ,(3)39. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.561885/>
- Francisco, P., Nicolle, J., & Corgnati, S. (2018). Spatial configuration and thermal resilience in vernacular courtyard houses. *Building and Environment*, 145, 155–170.
- Guillaud, H. (2008). Characterization of earthen materials. In *Terra literature review—an overview of research in earthen architecture conservation* (pp. 21–31). The Getty Conservation Institute.
- Huang, J., Li, Y., & Yang, X. (2020). Time-lag characteristics of thermal mass materials in passive buildings. *Journal of Building Engineering*, 32, 101566.
- Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012). The development of commercial wind towers for natural ventilation. *Applied Energy*, 92, 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>
- Li, S., et al. (2022). Energy saving and thermal comfort performance of passive retrofitting measures for traditional rammed earth house in Lingnan, China. *Buildings*, 12(10), 1716.
- Minke, G. (2006). *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture*. De Gruyter.
- Oliveti, G., Arcuri, N., De Simone, M., & Bruno, R. (2014). Solar heat gains and thermal behavior of adobe walls. *Energy and Buildings*, 84, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.013>
- Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2003). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 35(7), 762–776. [https://doi.org/10.1016/S2-00117\(02\)7788-0378](https://doi.org/10.1016/S2-00117(02)7788-0378)
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). *Passive cooling of buildings*. James & James. <https://doi.org/9781315071818/10.4324>
- Silva, R. A., et al. (2013). Conservation and new construction solutions in rammed earth. In *Structural rehabilitation of old buildings* (pp. 77–108). Springer.
- Valenzuela, M., et al. (2025). Designing sustainable cement free compositions with rice husk ash to improve mechanical performance in next generation ecoblocks. *Scientific Reports*, 15(1), 14920.
- Wasilowski, H., Reinhart, C., & Samuelson, H. (2009). Modeling an existing building in DesignBuilder/ EnergyPlus: Custom vs. default inputs.
- Zhang, R., & Hong, T. (2016). Modeling and simulation of operational faults of HVAC systems using EnergyPlus.

©Authors, Published by Ferdows-e-honar journal. This is an open-access paper distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

