

Research Paper

Analysis of the Characteristics of Openings on the South Side of the Building in Reducing Energy Consumption (Case Study: Rural Housing in Eastern Guilan)

Seyedeh Masoumeh Fotokian: Department of Architecture, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

Narjes Falakian *: Department of Architecture, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran

Seyedeh Mahdieh Mirmiran: Department of Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Mohammad Reza Vaezi: Department of Architecture, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

Received: 2025/06/25 PP 1-22 Accepted: 2025/09/09

Abstract

Identifying each of the components and indicators affecting energy loss in a building is not sufficient alone and limits appropriate design decisions. Most of the mutual changes of the indicators on each other provide the designer with wider choices. Therefore, the aim of the present study is to find indicators and convergences of the dimensions and proportions of optimized openings that have a greater impact on reducing energy consumption. The research method is of an applied and combined type that is applied by continuous steps. First, to find the current energy conditions and the optimal state, the selected residential building sample was modeled in Rhino 7 software and the initial stage of energy simulation was adjusted and output in the Grasshopper environment with the Honeybee extension. Then, other building indicators were assumed to be constant and indicators related to the dimensions and proportions of the openings were optimized with the aim of reducing energy consumption in three modes of total, heating, and cooling energy by means of the Galapagos extension. As a result, more than 2600 optimal cases were identified, and linear regression and Pearson correlation coefficient were applied to them to obtain more effective indicators and their convergence. The results indicate that WWR is associated with a strong correlation close to one in all energy consumption cases, and the next priorities for the entire energy consumption case are width and then height. This index also has a close to strong and moderate relationship with most of the indicators of the dimension groups and opening proportions. For other cases of the same energy consumption case, the ratios of width to OKB and WWR to the average OKB have strong convergences with energy consumption. OKB was also not a suitable criterion for strong convergences with energy and other indicators in all cases.

Keywords: Opening Proportions, Correlation, Optimization, Rural House, Eastern Guilan, Energy Consumption.



Citation: Fotokian, S. M., Falakian, N., Mirmiran, S. M., & Vaezi, M. R. (2025). **Analysis of the Characteristics of Openings on the South Side of the Building in Reducing Energy Consumption (Case Study: Rural Housing in Eastern Guilan).** *Journal of Sustainable Architecture and Environment*, 3(11), 1-22. <https://doi.org/10.25524/jsae.2025.1210252>



© The Author(s)

Publisher: Islamic Azad University of Shiraz

*. **Corresponding author:** Narjes Falakian, **Email:** na.falakian@iau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The energy crisis is particularly pressing in rural areas, which often face resource limitations compared to urban centers. Sustainable energy principles emphasize reducing energy needs, increasing renewable energy use, and optimizing consumption. In buildings, major energy consumption arises from heating, cooling, lighting, and appliances, with heating and cooling being the most significant. Various factors influence energy consumption, including building orientation, layout, window characteristics, insulation, and energy-efficient devices. These factors can be categorized into physical building characteristics, device/system features, resident energy behavior, and weather conditions. In Gilan province, despite favorable climate conditions, energy consumption remains high, particularly in Rudsar county, which is experiencing reverse migration and increased construction. This necessitates a focus on reducing energy consumption in the area. Hossein Abad village was selected for a case study to analyze how the dimensions of window openings affect energy consumption, particularly in heating and cooling, and to identify which indicators are most effective in reducing overall energy use.

Methodology

The present study employs an applied research approach, classified as dual according to Groot's combined research strategy, involving multiple strategies across four stages. The first stage focuses on identifying effective indicators related to window dimensions and proportions, highlighting key factors such as window width, height, and the window-to-wall ratio (WWR). In the second stage, a typical rural residential building in Rudsar County was modeled using Rhino software, and energy simulations were conducted in Grasshopper with the Honeybee extension. The third stage utilized the Wallace extension for single-objective optimization, targeting total, cooling, and heating energy consumption while parametrizing window dimensions. Finally, the results were analyzed using linear regression and correlation in Excel to explore the relationships between variables and assess the impact of opening indices on energy consumption modes, allowing for a

comparison of their relative strengths and weaknesses.

Results and Discussion

The study analyzes the correlations between various window dimensions and energy consumption across three categories: total, cooling, and heating energy. In total energy consumption, the window-to-wall ratio (WWR) shows the strongest correlation, followed by window width and height, while the correlation with the opening-to-building (OKB) ratio is minimal or negative. The highest correlations for width and height are observed in living spaces, with the WWR being prioritized over other indicators. For cooling energy, WWR again ranks highest, with window height and width following, all showing an inverse relationship with energy consumption. The height-to-OKB and width-to-OKB ratios are most correlated in all spaces. In heating energy consumption, WWR maintains a strong correlation, with window height and width closely linked, but overall correlations are weaker compared to cooling. The width-to-OKB and width-to-height ratios are again significant, with the weakest correlations found in the living space. The study highlights the importance of window dimensions in optimizing energy efficiency in residential buildings.

Conclusion

The study concludes that window dimensions, particularly the window-to-wall ratio (WWR), play a crucial role in influencing energy consumption in residential buildings. WWR consistently demonstrates the strongest correlation with total, cooling, and heating energy use, while the opening-to-building (OKB) ratio shows minimal impact. The analysis reveals that window width and height are particularly significant in living spaces, emphasizing their importance in energy optimization. Additionally, the study identifies that the relationships between window dimensions and energy consumption are generally stronger for cooling than for heating. Overall, the findings underscore the need to consider window design as a key factor in enhancing energy efficiency in residential architecture.

References

- Abdellatif, M., & Al-Shamma'a, A. (2015). Review of sustainability in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 14, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.09.002>
- Akbari, H. (2020). Design of a residential tower in Babolsar for energy consumption reduction through high-rise building form optimization (using energy analysis software) (Master's thesis). Amol Institute of Higher Education. [In Persian]
- Akhtarkavan, M., & Shafiee, S. (2023). The effect of window dimensions on natural lighting and energy consumption in residential complexes in hot and dry climates of Iran: A case study of Isfahan. *Arman Shahr Architecture and Urbanism*, 42, 17–30. <https://doi.org/10.22034/aaud.2021.174175.1822>[In Persian]
- Ashnavar, M., & Bina, M. (2022). The effect of window shape on the amount of radiation received and cooling load in a residential building in Ahvaz, Iran. *International Journal of Ambient Energy*, 43, 7548–7559. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2059781>
- Ayyad, T. M. (2011). *The impact of building orientation, opening to wall ratio, aspect ratio and envelope materials on buildings energy consumption in the tropics* (Doctoral dissertation, The British University in Dubai).
- Azarnio, N.; Pourtaheri, M.; & Rokneddin Eftekhari, A. R. (2023). Analysis of factors affecting the sustainability of rural housing: A case study of Balian Rural District, Kazeroon County. *Geography and Environmental Sustainability*, 13(2), 115–131. <https://doi.org/10.22126/ges.2023.8407.2589>[In Persian]
- Bagheri, S., Moradinasab, H., & Yeganeh, M. (2024). The effect of window proportions in low-rise residential buildings on annual energy consumption in humid temperate climate: Case study of Rasht city in Iran. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1463678. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1463678>
- Bera, M., & Nag, P. K. (2022). Bioclimatic design of low-cost rural dwellings. *Frontiers in Built Environment*, 8, 773108. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.773108>
- Boitor, R. M., Antov, D., & Iliescu, M. (2013). Sustainable urban transport planning. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 2(1). <https://doi.org/10.1515/rjti-2015-0010>
- Cattaneo, T., Giorgi, E., Ni, M., & Manzoni, G. D. (2016). Sustainable development of rural areas in the EU and China: A common strategy for architectural design, research practice and decision-making. *Buildings*, 6(4), 42. <https://doi.org/10.3390/buildings6040042>
- Chaturvedi, S. (2008). Energy efficiency and sustainability in buildings. In *AEI 2008: Building Integration Solutions* (pp. 1–8).
- Chiesa, G., Acquaviva, A., Grosso, M., Bottaccioli, L., Floridia, M., Pristeri, E., & Sanna, E. M. (2019). Parametric optimization of window-to-wall ratio for passive buildings adopting a scripting methodology to dynamic-energy simulation. *Sustainability*, 11, 3078. <https://doi.org/10.3390/su11113078>
- Dagiyan, M. M., Molaei, M., Fallah, R., & Sangin, H. (2024). Enhancing energy efficiency in a hypothetical building through analysis of orientation, WWR, shading, window shape, and illuminance intensity. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4904853/v1>
- Falah, H. (2019). Determining the optimal window-to-wall ratio in the southern facade of educational buildings in Kerman. *Naqsh-e Jahan Journal*, 34, 105–115. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1398.9.2.3.4>[In Persian]
- Farivar, S., & Teimourtash, S. (2023). Impact of window design on dynamic daylight performance in an office building in Iran. *Journal of Daylighting*, 10(1), 31–44. <https://doi.org/10.15627/jd.2023.10.1.31>
- Garaji Mahlabani, Y., & Yaran, A. (2010). Sustainable architecture solutions in Gilan with comparison to Japanese architecture. *Journal of Fine Arts – Architecture and Urbanism*, 15(41), 43–54. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286020.1389.2.41.4.1>[In Persian]
- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43, 1030–1037. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>
- Gilan Provincial Management and Planning Organization. (2021). *Statistical yearbook of Gilan province*.
- Hadadzadegan, H., Zamordian, Z. S., & Tahsildoust, M. (2020). Evaluation of sensitivity of architectural variables of high-rise buildings in thermal performance and energy consumption in different climates. *Architecture of Hot and Dry Climate*, 8(12), 244–262. <https://doi.org/10.29252/ahdc.2021.14249.1370>[In Persian]
- Heydari, A., Sadati, S. E., & Gharib, M. R. (2021). Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building*

- Engineering, 35, 102099.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102099>
- Inanici, M. N., & Demirbilek, F. N. (2000). Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. *Building and Environment*, 35, 41–52.
[https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00002-5)
- Jiang, W., Liu, B., Li, Q., Li, D., & Ma, L. (2021). Weight of energy consumption parameters of rural residences in severe cold area. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101131.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101131>
- Kasmaei, M. (1993). Climate zoning of Iran. *Tazehaye Sakhteman va Maskan*, 151.
- Kasmaei, M. (2009). Climate zoning and design guide for the moderate and humid climate (Gilan and Mazandaran provinces). Tehran: Road, Housing and Urban Development Research Center.
- Khakpour, M. (2005). Indigenous housing in rural communities of Gilan. *Journal of Fine Arts*, 22(22), 63–72.
https://jhz.ut.ac.ir/article_10739.html [In Persian]
- Kharabati, S., & Nikmard, A. (2022). Investigating factors affecting rural architecture sustainability: Case study of Armian Village, Miyami. *Rural Studies*, 51, 504–525.
<https://doi.org/10.22059/jrur.2022.338677.1720> [In Persian]
- Kheiri, F., & Arch, M. (2013). The relation of orientation and dimensional specifications of window with building energy consumption in four different climates of Koppen classification. *Researcher*, 12, 107–115.
<https://doi.org/10.7480/abe.2018.19.2528>
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998). *Introduction to sustainable design* (Doctoral dissertation, National Pollution Prevention Center for Higher Education).
- Koohsari, A. M., Fayaz, R., & Kari, B. M. (2015). The influence of window dimensions and location on residential building energy consumption by integrating thermal and lighting analysis in a mild and humid climate. *BRIS Journal of Advances in Science and Technology*, 3, 187–194.
- Lang, J. (2023). *The creation of architectural theory: The role of behavioral sciences in environmental design* (12th ed.; translated by A. R. Eyni Far). Tehran: University of Tehran Press.
- Li, W., Meng, X., & Huang, Y. (2021). Fitness distance correlation and mixed search strategy for differential evolution. *Neurocomputing*, 458, 514–525.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.141>
- Liu, K., Xu, X., Zhang, R., Kong, L., Wang, W., & Deng, W. (2023). Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China. *Energy and Buildings*, 280, 112727.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112727>
- Lu, S., Tang, X., Ji, L., & Tu, D. (2017). Research on energy-saving optimization for the performance parameters of rural-building shape and envelope by TRNSYS-GenOpt in hot summer and cold winter zone of China. *Sustainability*, 9, 294.
<https://doi.org/10.3390/su9020294>
- Maleki, A., & Dehghan, N. (2020). Optimization of energy consumption and daylight performance in residential building regarding window design in hot and dry climate of Isfahan. *Science and Technology for the Built Environment*, 27, 351–366.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1812294>
- Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2017). Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 13, 169–183.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.001>
- Miri, B., Azami, A., & Akbarpour, M. (2020). Structural and functional analysis of rural housing sustainability: Case study of Sarfirouzabad Rural District, Central Kermanshah. *Physical Planning and Development*, 20, 53–73.
<https://doi.org/10.30473/psp.2021.51392.2257> [In Persian]
- Mirmiran, S. M., Malek Afzali, A., & Karimi Fard, L. (2020). Pattern analysis of traditional Gilan houses. *Housing and Rural Environment*, 39(171), 117–128.
<https://doi.org/10.22034/39.171.117> [In Persian]
- Mofidi, M. R., & Mofidi, S. (2021). *Specialized research methods in architecture and energy* (1st ed.). Tehran: Kian Danesh. [In Persian]
- Mokhtari, R., Dehghan, N., & Maleki, A. (2023). Analysis of the impact of window properties on the main living space with the aim of daylight efficiency and energy saving in the hot and dry climate of Isfahan. *Journal of Solar Energy Research*, 8, 1235–1249.
<https://doi.org/10.22059/jser.2022.349312.1258>
- Najafi, N., & Ali Al-Hesabi, M. (2022). Revisiting the concept of context in the modernization of rural architecture: Case study of Beliran Village, Mazandaran. *Economic Geography Research*, 3(7), 20–41.

- <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27173747.140.1.3.7.2.7>[In Persian]
- Nourian, A., & Zahri, S. (2023). Strategies for reducing energy consumption and climate-adaptive design in Hamedan city inspired by traditional Qajar houses. *Architecture and Sustainable Environment Quarterly*, 1(4), 77–92.
<https://sanad.iau.ir/Journal/jsae/Article/1103515>[In Persian]
- Olladi, M., Tarkashvand, A., & Feyzi, M. (2022). Correlation between building sizes in urban blocks and annual heating and cooling loads. *Urban Studies*, 6(1), 71–91.
<https://doi.org/10.22124/upk.2022.21344.1712>[In Persian]
- Peng, L., Wu, H., Wei, W., Ma, J., & Li, S. (2019, December). Analysis of rural housing design optimization based on value engineering. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 358, No. 4, p. 042036). IOP Publishing.
- Pirzad, A., & Riahi Moghaddam, S. (2019). A survey for relationship between ecological rural architecture and rural economy in moderate-humid regions and hot-dry areas. *Art and Technique*, 1(1), 41–59.
- Pourmoosi, M., Mofidi Shamirani, S. M., & Mahmoudi Zarandi, M. (2020). Analysis of opening principles and their effect on airflow in residential buildings in moderate and humid climates of Iran: Case study of Kolbadi House in Sari and Shafahi House in Amol. *Journal of Environmental Science and Technology*, 99, 349–362.
<https://doi.org/10.22034/jest.2021.30727.3918>[In Persian]
- Pourtaheri, M., & Hemmati, S. (2017). Comparative assessment of the sustainability of rural housing in the old and new textures of rural areas: A case study in villages of central area of Kabudarahang County. *Journal of Sustainable Rural Development*, 1(1), 69–82.
<https://doi.org/10.18869/nrip.jsrd.1.1.67>
- Rafsanjani, H. N., Ahn, C. R., & Alahmad, M. (2015). A review of approaches for sensing, understanding, and improving occupancy-related energy-use behaviors in commercial buildings. *Energies*, 10, 10996–11029.
<https://doi.org/10.3390/en81010996>
- Rahsepar Monfared, R., & Azamati, S. (2021). Wind behavior analysis in natural ventilation and energy reduction in residential buildings based on vernacular architecture: The effect of opening dimensions and placement in Amol. *Arman Shahr Architecture and Urbanism*, 35, 103–114.
<https://doi.org/10.22034/aaud.2020.210648.2058>[In Persian]
- Razmi, H., Gholami, M., & Hosseinizad, L. (2024). An essay on structural features of rural housing architecture in Gorgan County: A case study of Shahkouh Sofla Village. *Modern Research in Geographic, Architectural and Urban Studies*, 5(46), 81–112. [In Persian]
- Saber, A. (2021). Effects of window-to-wall ratio on energy consumption: Application of numerical and ANN approaches. *Soft Computing in Civil Engineering*, 5, 41–56.
<https://doi.org/10.22115/SCCE.2021.281977.1299>
- Sadeghi, Z., Azizpour, F., Tahmasebi, A., & Sartipour, M. (2022). A conceptual framework for sustainable rural housing development, based on the theoretical orientation of scientific articles. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 4, 1–22.
https://www.srds.ir/article_146341.html?lang=en
- Sanaei Moghaddam, S., & Mohammadi Yeganeh, B. (2017). Analysis of factors affecting the sustainability of rural housing: Case study of rural settlements in Charusa District, Kohgiluyeh. *Geographical Thought*, 16, 119–144.
https://geonot.znu.ac.ir/article_25846.html[In Persian]
- Sartipour, M. (2005). Indicators of rural housing architecture in Iran. *Journal of Fine Arts – Architecture and Urbanism*, 10(2), 43–52.
https://jhz.ut.ac.ir/article_10737.html[In Persian]
- Shao, N., Zhang, J., & Ma, L. (2017). Analysis on indoor thermal environment and optimization on design parameters of rural residence. *Journal of Building Engineering*, 12, 229–238.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.05.003>
- Shao, T., Zheng, W., & Cheng, Z. (2021). Passive energy-saving optimal design for rural residences of Hanzhong region in northwest China based on performance simulation and optimization algorithm. *Buildings*, 11, 421.
<https://doi.org/10.3390/buildings11090421>
- Soudbaksh, K., Etminan, M., Hakimazari, M., & Salavatian, S. (2022). Impacts of window factors and building orientation on energy consumption in residential buildings of humid temperate climatic zone in Iran. *Journal of Construction in Developing Countries*, 27, 235–262. <https://doi.org/10.21315/jcdc-04-21-0061>
- Susorova, I., Tabibzadeh, M., Rahman, A., Clack, H. L., & Elnimeiri, M. (2013). The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy and Buildings*, 57, 6–13.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>

- Tahbaz, M., & Jalilian, S. (2011). Climate-adaptive indicators in rural housing of Gilan Province. *Housing and Rural Environment*, 135. <http://jhre.ir/article-1-202-fa.html>
- Tawfeeq, H., & Qaradaghi, A. M. A. (2024). Optimising window-to-wall ratio for enhanced energy efficiency and building intelligence in hot summer Mediterranean climates. *Sustainability*, 16(17), 7342. <https://doi.org/10.3390/su16177342>
- Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109434. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- Vanhoutteghem, L., Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy and Buildings*, 102, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.018>
- Vettorato, D. (2011). Bridging urban morphology and energy performance analysis. In *47th ISOCARP Congress* (pp. 1–12).
- Wu, C., Pan, H., Luo, Z., Liu, C., & Huang, H. (2024). Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II. *Building and Environment*, 254, 111386. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111386>
- Zandieh, M., & Hesari, P. (2012). Continuity of rural housing architecture motivated by sustainable rural development. *Housing and Rural Environment*, 138, 63–72. <https://jhre.ir/article-1-166-fa.html> [In Persian]
- Zhang, Y., Omer, S., & Hu, R. (2025). Impact of window size modification on energy consumption in UK residential buildings: A feasibility and simulation study. *Sustainability*, 17(7), 3258. <https://doi.org/10.3390/su17073258>
- Zhou, J., & Hua, Z. (2022). A correlation guided genetic algorithm and its application to feature selection. *Applied Soft Computing*, 123, 108964. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108964>



تحلیل شاخصه‌های بازشوهای ضلع جنوبی ساختمان در کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی: مسکن روستایی شرق گیلان)

سیده معصومه فتوکیان: گروه معماری، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران.

نرجس فلکیان^۱: گروه معماری، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران.

سیده مهدیه میرمیران: گروه معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

محمدرضا واعظی: گروه معماری، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴ صص ۲۲-۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

چکیده

شناسایی هر یک از مولفه‌ها و شاخص‌های موثر بر اتلاف انرژی در ساختمان، به تنهایی کافی نبوده و تصمیمات مناسب طراحی را محدود می‌کند. بخش اعظم تغییرات متقابل شاخص‌ها بر یکدیگر، انتخاب‌های گسترده‌تری را به دست طراح می‌دهد. از این رو هدف پژوهش حاضر، یافتن شاخصه‌ها و همگرایی‌هایی از ابعاد و تناسبات بازشوهای بهینه شده که تاثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی دارند، می‌باشد. روش پژوهش از نوع کاربردی و ترکیبی است که توسط گام‌های پیوسته اعمال می‌شود. ابتدا برای یافتن شرایط وضع موجود انرژی و حالت بهینه، مدلسازی نمونه بنای مسکونی منتخب در نرم‌افزار Rhino 7 انجام گرفت و مرحله اولیه شبیه‌سازی انرژی، در محیط گرس‌هاپر و با افزونه هانی‌بی تنظیم و خروجی گرفته شد. سپس سایر شاخص‌های دیگر بنا، ثابت فرض گردید و شاخص‌های مرتبط با ابعاد و تناسبات بازشو با هدف کاهش مصرف انرژی در سه حالت انرژی کل، گرمایشی و سرمایشی به وسیله افزونه گالاپاگوس مورد بهینه‌یابی تک‌هدفه قرار گرفتند. در نتیجه آن، بیش از ۲۶۰۰ حالت از موارد بهینه، شناسایی شد که برای دریافت شاخص‌های موثرتر و همگرایی بینشان، رگرسیون خطی و ضریب همبستگی پیرسون بر روی آن‌ها اعمال گردید. نتایج بیان می‌کند که WWR همراه با همبستگی قوی نزدیک به یک در تمام حالت‌های مصرف انرژی بوده و اولویت‌های بعد از آن برای کل حالت مصرف انرژی، عرض و سپس ارتفاع قرار می‌گیرد. همچنین این شاخص با اغلب شاخص‌های گروه‌های ابعاد و تناسبات بازشو رابطه نزدیک به قوی و متوسط دارد. برای دیگر موارد همین حالت مصرف انرژی نیز نسبت‌های عرض به OKB و WWR به میانگین OKB، از همگرایی‌های قوی با مصرف انرژی برخوردارند. OKB نیز در همه حالات، معیار مناسبی برای همگرایی‌های قوی با انرژی و سایر شاخص‌ها نبوده است.

واژه‌های کلیدی: تناسبات بازشو، همبستگی، بهینه‌یابی، خانه روستایی، شرق گیلان، مصرف انرژی.

استناد: فتوکیان، سیده معصومه؛ فلکیان، نرجس؛ میرمیران، سیده مهدیه و واعظی، محمدرضا (۱۴۰۴). تحلیل شاخصه‌های بازشوهای

ضلع جنوبی ساختمان در کاهش مصرف انرژی (نمونه موردی: مسکن روستایی شرق گیلان). فصلنامه معماری و محیط

پایدار، ۳(۱۱)، ۲۲-۱. <https://doi.org/10.25524/jsae.2025.1210252>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

نویسندگان



^۱ نویسنده مسئول: نرجس فلکیان، پست الکترونیکی: na.falakian@iau.ac.ir

مقدمه

مسئله بحران انرژی و ضرورت صرفه‌جویی در مصرف آن علی‌الخصوص در روستاها اهمیت بالایی دارد. چرا که همواره از منابع کمتر مانند پایین بودن سطح زندگی در روستا، نبود تخصص، دور بودن از امکانات شهری، مشکل دسترسی، مشکلات معیشتی و امثال آن نسبت به شهرها برخوردار بوده‌اند (طاهباز و جلیلیان، ۱۳۹۰). اصول پایداری انرژی سکونتگاه‌ها در مجموعه‌ای تعاریف ارائه‌شده به سه مورد اشاره دارند که شامل کاهش نیاز انرژی، استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی آن با سوخت‌های فسیلی و بهینه‌سازی مصرف انرژی بوده است (Vettorato, 2011; Abdellatif & Al-Shamma'a, 2015; Kim & Rigdon, 1998). مصارف اصلی انرژی در بخش ساختمان مربوط است به بخش روشنایی، گرمایش و سرمایش، وسائل و تجهیزات، اتلاف انرژی، که گرمایش و سرمایش، بخش اعظم آن را به خود اختصاص داده است (اکبری، ۱۳۹۹).

در مطالعات گوناگون برای شناخت شاخص‌های موثر بر مصرف انرژی ویژگی‌هایی ذکر شده که برای مثال به مواردی از قبیل جهت‌گیری ساختمان، چیدمان فضاها، داخلی، قرار دادن پنجره، اندازه و سایه، استفاده از عایق، تهویه، تصحیح پیش‌نویس، استفاده از مصالح ساختمانی جاذب حرارت، محوطه‌سازی، استفاده از وسایل کارآمد انرژی مربوط می‌شود (Chaturvedi, 2008). به طور کلی می‌توان این عوامل را به چهار دسته اصلی تقسیم کرد که شامل مشخصات فیزیکی ساختمان، ویژگی‌های دستگاه‌ها و سیستم‌ها، ویژگی‌های رفتار انرژی ساکنان و ویژگی‌های آب و هوا است (Rafsanjani et al, 2015). همچنین با توجه به نوع اقلیم و معماری بومی متاثر از آن در منطقه معتدل و مرطوب، ویژگی جداره‌ها، بازشوها و حتی چینش فضاها در ضلع جنوبی اهمیت زیادی دارد (مهلبانی و دانشور، ۱۳۸۹؛ زاهدی، ۱۳۷۷). از طریق طراحی دقیق اندازه و محل پنجره‌ها و انتخاب مصالح مناسب، نه تنها می‌توان مصرف انرژی ساختمان‌ها را کاهش داد، عملکرد انرژی ساختمان‌ها را بهبود بخشید، بلکه می‌توان سهم قابل توجهی در بهبود محیط زندگی داشت (Zhang et al, 2025: 2) ویژگی‌های مختلف پنجره می‌تواند بر نیازهای انرژی داخلی مانند نسبت پنجره به دیوار (WWR)، جهت‌گیری، نسبت (طول به ارتفاع) و قرارگیری پنجره در ضلع بیرونی ساختمان تأثیر بگذارد (Kheiri & Arch, 2013). واکاوی تأثیر هر یک از موارد مهم مانند زیرمؤلفه‌های بازشوها این است که با روش‌های مختلف بهینه‌یابی، شناخت مختصری از آن شاخص‌ها را به همراه دارد؛ چرا که نتیجه اصلی از مصرف انرژی در ساختمان با تعامل همزمان مجموعه‌ای از پارامترها همراه است. لذا تشخیص همگرایی‌ها با هدف کاهش مصرف انرژی می‌تواند شناخت کاملتری از روابط و توان کاربرد شاخص‌ها را ممکن سازد. برای مثال تأثیرات همگرایی WWR با سرمایش، روشنایی و تهویه بسیار بیشتر است از گرمایش است (Heydari et al, 2021). اولویت این مجموعه بررسی و شناسایی ضرورت جلوگیری از اتلاف انرژی در ساختمان‌های مسکونی، به مناطق مستعد و دارای سیر صعودی مصرف انرژی اختصاص می‌یابد. آمارها بیانگر این است که استان گیلان به نسبت سایر استان‌های کشور با وجود مساعد بودن اقلیم و شرایط آسایش دمایی و همچنین عدم مصرف انرژی کلان برای کاربری صنعتی مانند بعضی از استان‌های صنعتی کشور، مصرف انرژی زیادی را برای برق و گاز دارد. همچنین مهاجرپذیر بودن این استان و افزایش شدت این شاخصه در سال‌های اخیر با توجه به بیابان‌زایی و تغییر اقلیم در استان‌های جنوبی کشور، نوید افزایش ساخت و سازها را در آینده می‌دهد لذا این روند مصرف انرژی که تابعی از جمعیت نیز می‌باشد، رو به افزایش خواهد بود (سالنامه آماری، ۱۳۹۸). طبق همین اطلاعات در استان گیلان، شهرستان رودسر نیازمند شرایط ویژه‌ای برای توجه به وضعیت فعلی و آینده مصرف انرژی است. روند رو به رشد مهاجرت‌های معکوس به روستاهای این شهرستان و وضعیت مصرف انرژی‌های برق و گاز بدون وجود نیروگاه یا شرایط اقلیمی پرمصرف، از جمله عواملی که بررسی‌های حول کاهش مصرف انرژی در این شهرستان را ضروری می‌سازد (سالنامه آماری، ۱۳۹۶-۱۴۰۰).

با توجه به مطالب بیان شده، برای انتخاب نمونه موردی با در نظر گرفتن هدف کاهش مصرف انرژی، روستای حسین آباد شهرستان رودسر به دلیل افزایش صدور پروانه ساخت در سالهای اخیر، انتخاب شد؛ که رفتار شاخص‌های بهینه شده بازشوها جنوبی آن بر مصرف انرژی و همچنین با یکدیگر، بررسی گردد. حال پرسش این است که چه شاخصه‌هایی از ابعاد بازشو در مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی بیشتر تأثیر دارند؟ و کدام شاخصه‌ها برای کاهش مصرف انرژی، همگرا تر هستند؟

پیشینه و مبانی نظری تحقیق

از دیدگاه جان لنگ^۱ در شکل‌گیری مسکن روستایی دو عامل انسان و محیط یعنی روابط انسان با انسان و انسان با محیط (جغرافیایی) نقش دارند. عامل جغرافیایی یعنی رابطه انسان با طبیعت، که خود به دو عامل محیط پیرامون و عامل طبیعی تقسیم می‌شود؛ عامل محیط پیرامون با خصوصیات آب و هوایی منطقه در ارتباط هست و عامل طبیعی به خصوصیات استقرار مسکن در دسته‌بندی جلگه‌ای، کوهستانی، کوهپایه‌ای

^۱ Jon Lang

و ساحلی اشاره دارد. عامل انسانی به روابط انسان با انسان در محیط و در قالب ویژگی‌های فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی ایفای نقش می‌کنند (لنگ، ۱۴۰۲). دستیابی به مسکن پایدار بایستی با چهار بعد زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و کالبدی همراه باشد. در واقع مسکن پایدار در پی این است که کیفیت همه‌جانبه را در زندگی محیط زیست، جامعه و اقتصاد در نظر داشته‌باشد (میری و همکاران، ۱۳۹۹، ص ۵۷). پژوهش‌هایی که به طرح موضوع مولفه‌های موثر بر شکل‌گیری مسکن پایدار روستایی پرداخته‌اند به تعاریف مربوط به مسکن پایدار توجه داشته‌اند و حتی در بررسی‌های میدانی و مقایسه وضع موجود در نمونه روستاهای مختلف از همین نوع تقسیم‌بندی و با اندکی تغییرات، پیروی نموده‌اند (میری و همکاران، ۱۴۰۱؛ آذرنبو و همکاران، ۱۴۰۲؛ خراباتی و نیک مرد، ۱۴۰۱؛ زندیه و حصاری، ۱۳۹۱؛ میری و همکاران، ۱۳۹۹). از این میان بعد زیست محیطی از جمله ابعاد مهم و سازنده آن در امر پایداری است که در همه مولفه‌های خود، دو هدف اصلی انطباق‌پذیری با محیط زیست و بهینه‌گی در مصرف انرژی را در نظر دارد (Sadeghi et al, 2022) و بخش اقتصادی نیز دارای اثرات متقابل زیادی با عوامل مذکور است. با توجه به ارتباط مفهومی با رویکرد پژوهش حاضر، شاخص‌های مرتبط با بازشو از رهگذر دو عامل طبیعی و اقتصادی، در نظر گرفته خواهند شد.

عوامل مختلف تاثیرگذار بر مصرف انرژی در ساختمان، شامل گستره زیادی از مولفه‌ها و شاخص‌ها می‌باشد. بررسی میان تاثیرات برخی مولفه‌های موثر مانند فرم، جهت‌گیری، سطح بازشوها، تناسبات حیاط و برخی دیگر در تهویه، نور، اتلاف انرژی و نیاز سرمایش و گرمایش برخی خانه‌های سنتی همدان توسط نوریان و زهری انجام گرفته است؛ که در این همسویی طراحی معماری با اقلیم توسط نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی، الگوهای موجود در کالبد خانه‌ها استخراج و دستورالعمل‌های طراحی ارائه شد (نوریان و زهری، ۱۴۰۲: ۸۱). همچنین در تحقیق وو و همکاران، مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی ساختمان از جمله پارامترهای پوشش جداره و عملکرد ساختمان با در نظر گرفتن سه هدف مصرف انرژی، آسایش حرارتی و عملکرد نور روز را در یک ساختمان مسکونی در دو منطقه تابستانی گرم و زمستانی سرد مورد بهینه‌یابی چندهدفه قرار دادند که در انتها نقاط ایده‌آل برای ترکیب بهینه پارامترهای ساختمان ارائه کردند (Wu et al, 2024). به طور کلی بررسی رفتار بازشو در منابع مربوط به اقلیم و بحث انرژی، نقش پر رنگی دارد. برای مثال در مقاله با عنوان پهنه‌بندی اقلیمی ایران، مسکن و محیط مسکونی (کسمائی، ۱۳۷۲: ۱۴۰) و کتاب پهنه‌بندی و راهنمای طراحی اقلیمی، اقلیم معتدل و مرطوب (استان‌های گیلان و مازندران) از کسمائی، به اهمیت و تاثیر اقلیم بر ابعاد بازشو و حالات مختلف رفتار آن پرداخته است (کسمائی، ۱۳۸۸: ۲۱۳-۲۲۱). کوهساری و همکاران تغییرات در موقعیت پنجره عمودی و همچنین عرض و ارتفاع پنجره را به طور جداگانه مورد مطالعه قرار داد. از آنجایی که مطالعات عرض و ارتفاع دارای مساحت پنجره ثابت نبودند، نتایج عمدتاً اثرات تغییر اندازه را نشان دادند. با این حال، اشاره شد که حداقل در بافت مدیرانه‌ای، ارتفاع بیشتر از عرض بر مصرف انرژی تأثیر دارد که بیانگر تأثیر شکل می‌باشد (Koohsari et al, 2015). در تحقیقی که توسط توفیق و قره‌داغی انجام گرفت، تأثیرات بهبود WWR بر بهره‌وری انرژی در آپارتمان‌های مسکونی کم ارتفاع در شهر سلیمانیه که با آب و هوای گرم تابستانی مدیرانه‌ای روبرو هستند، بررسی شد و حاصل آن به طور خلاصه شامل توصیه به استفاده از ۶۵ درصد WWR برای دیوارهای جنوبی و شرقی و ۹۵ درصد و ۳۰ درصد برای دیوارهای شمالی و غربی بود (Tawfeeq & Qaradaghi, 2024: 1). لحاظ نمودن اندازه OKB پنجره نیز در مطالعات گوناگونی صورت گرفته است و در اغلب موارد نقش کم‌رنگ‌تری نسبت به اندازه‌ها و نسبت‌های پنجره داشته است (Dagiyan et al, 2024; Soudbaksh et al, 2022; Kheiri, 2013).

با توجه به اقلیم مورد مطالعه در این پژوهش، در مقاله‌ای از رهسپار منفرد و عظمتی، با شبیه‌سازی انرژی مدل بنای مورد بحث در بازه‌بندی حالت‌های بسته و باز بودن سطح بازشو به همراه تقسیمات و نسبت‌های آن در جهت‌های مختلف بنا به وسیله نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر، تلاش نموده به بهینه‌یابی این عضو از بنا برای کاهش مصرف انرژی با تأکید بر بحث تهویه طبیعی در اقلیم معتدل و مرطوب شهر آمل دست یابد (رهسپار منفرد و همکاران، ۱۳۹۹). در مقاله سودبخش و همکاران، متفاوت با سایر تحقیقات اقلیم معتدل و مرطوب که تأکید خاصی بر تهویه دارد، یک شبیه‌سازی کامپیوتری برای بررسی تأثیر پارامترهای طراحی نما، از جمله مقادیر U^1 ، نسبت پنجره به دیوار (WWR)، تقسیمات بازشوی پنجره و عمق دستگاه‌های سایه‌بان بر مصرف انرژی ساختمان انجام گرفته است (Soudbaksh et al, 2022: 235). مصرف انرژی در اقلیم معتدل و مرطوب به سبب افزایش رطوبت هوا در زمان‌های مختلفی از سال که خارج از محدوده آسایش می‌گردد، متأثر از تهویه طبیعی است؛ اما باید در نظر داشت که موارد حرارتی و سرمایش فعال نیز در کنترل این مسئله در جهت جنوب ساختمان تأثیرگذارند که در اکثر تحقیقات انجام گرفته برای این اقلیم، کمتر مورد توجه واقع شده است.

مطالعات مختلف در اقلیم‌های گوناگون به بررسی تأثیر پارامترهای تاثیرگذار بازشو بر مصرف انرژی پرداخته‌اند که با گذر زمان روشن‌تر شده است. محققان با توجه به اهمیت هر شاخص، زیرمولفه‌ها و گاه از چند بعد شاخص شامل ابعاد، تناسبات و جنس را برای پژوهش انتخاب

¹ U-factor

کرده‌اند تا تصویری جامع‌تر بدست آورند. همچنین در بررسی بناهای مسکونی روستایی ایران، تفاوت چندانی با شهری نیست به همین دلیل برای بررسی‌ها، در صورتی که نوع روستایی برای پارامتر یافت نشد، می‌توان از کاربری صرفاً مسکونی استفاده نمود. بیشترین انتخاب پارامتر برای بازشو از میان ابعاد و اندازه‌ها، مساحت، عرض، ارتفاع و OKB پنجره، از میان تناسبات، WWR، نسبت عرض به ارتفاع و نسبت عرض و ارتفاع به OKB و از مصالح نیز دو شاخص ضریب انتقال حرارت (U) و ضریب افزایش حرارت خورشیدی شیشه (SHGC)^۱ بودند. از آنجا که اهداف مطالعات در این حوزه دارای همپوشانی میان معیارهای اقتصادی و محیط زیستی مسکن روستایی است، اشتراکات زیادی در انتخاب مولفه و شاخص‌ها برای بررسی دارند (جدول ۱).

جدول ۱- شاخص‌های بازشو در تحقیقات مربوط به ساختمان‌های مسکونی با توجه به معیارهای مسکن روستایی

معیار	خلاصه معیار	مولفه‌های بازشو		
		ابعاد و اندازه‌ها	تناسبات	مصالح
اقتصادی	مصالح پایدار و مصالح بومی با دوام در دسترس، سهولت تعمیر و نگهداری، نگاه اقتصادی به قیمت مصالح، هزینه اجرایی، زمان ساخت و تامین نیروی انسانی، کاهش ضایعات در فرآیند ساخت مسکن، استفاده از تکنیک‌های بهینه ساخت معاصر در کنار شیوه‌های سنتی ساخت	عرض- ارتفاع- ضخامت شیشه- تعداد لایه‌های جداره و ضخامت لایه‌های هوا (برای شیشه‌های دو و چندجداره)- مساحت- فاصله از چهار لبه‌های جانبی دیوار- فاصله پنجره‌ها از یکدیگر- ارتفاع بازشو از سطح زمین- زاویه جهت قرارگیری افقی	نسبت مساحت بازشو به عمق- نسبت مساحت بازشو به سطح دیوار (WWR)- نسبت عرض به ارتفاع- نسبت عمق سایبان به ابعاد اصلی (شامل عرض، ارتفاع، مساحت و عمق) بازشو- نسبت مساحت به ارتفاع از سطح زمین- نسبت مساحت بازشو به طبقات.	- ضریب تبادل حرارت (U- Value) شیشه و فریم- ضریب افزایش حرارت خورشیدی شیشه (SHGC)
محیطی و طبیعی	- انتخاب مصالح استاندارد و رنگ سطوح مطابق شرایط محیطی مانند اقلیم و زلزله، توجه به شکل، اجزاء و چینش بازشوها برای بهره‌گیری از تابش آفتاب و باد - بهبود کیفیت زندگی گروه‌های ضعیف، مانند سالمندان و کودکان (آسایش حرارتی)، لحاظ کردن جنبه‌های عایق‌بندی حرارتی و ضد آب بودن طبق سازگاری با آب و هوای محلی، انتخاب مصالح و مواد و تنظیم فضاها طبق نکات بهداشتی محیط‌های انسان ساخت	عرض- ارتفاع- عمق قاب پنجره- ضخامت شیشه- تعداد لایه‌های جداره و ضخامت لایه‌های هوا (برای شیشه‌های دو و چندجداره)- مساحت- ارتفاع کف داخلی تا لبه پایین بازشو (OKB)- فاصله از چهار لبه‌های جانبی دیوار- فاصله پنجره‌ها از یکدیگر- ارتفاع بازشو از سطح زمین- زاویه جهت قرارگیری عمودی- زاویه جهت قرارگیری افقی- تعداد تقسیمات در هر نما.	نسبت مساحت بازشو به عمق- نسبت مساحت بازشو به سطح دیوار (WWR)- نسبت عرض به ارتفاع- نسبت مساحت بازشو به فواصل از چهار لبه‌های جانبی دیوار- نسبت عرض و ارتفاع به OKB- مساحت و WWR به عمق و مساحت اتاق- نسبت عمق سایبان به ابعاد اصلی (شامل عرض، ارتفاع، مساحت و عمق) بازشو- نسبت مساحت به ارتفاع از سطح زمین- نسبت مساحت به تقسیمات- نسبت مساحت بازشو به طبقات.	- ضریب تبادل حرارت (U- Value) شیشه و فریم- ضریب افزایش حرارت خورشیدی شیشه (SHGC)- شدت رنگ و انعکاس و انتشار شیشه- حرارت خورشیدی شیشه و نفوذ آن
منابع	Pirzad & Riahi (2019: 191). (Moghaddam, 2019: ۹۴). (رزمی و همکاران، ۱۴۰۳: ۹۴). (سرتیپی‌پور، ۱۳۸۴: ۴۷). Pourtaheri & Hemmati, (2017: 76). (Li et al, 2023). (سنایی‌مقدم و محمدی یگانه، ۱۳۹۶، ص ۱۳۹). (نجفی و علی الحسابی، ۱۴۰۱: ۳۵). (Cattaneo et al, 2016). (Peng, 2019: 3). (Bera & Nag, 2022).	Shao et al, (2021) - (Jiang et al, 2021) - (Liu et al, 2023) - (al, 2021) - (Inanici & Demirbilek, 2000) - (Kheiri & Arch, 2013) - (Gasparella et al, 2011) - (Soudbaksh et al, 2022) - (Dagiyan et al, 2024) - (Ashnavar & Bina, 2022) - (اخترکاوان و شفیی، ۱۴۰۲)	Maleki & Lu et al, (2017) - (Dehghan, 2020) - (Susorova et al, 2013) - (Vanhouetteghem et al, 2015) - (Marino et al, 2017) - (Mokhtari et al, 2023) - (Ayyad, 2011) - (Saber, 2021) - (Chiesa et al, 2019)	-(Shao et al, 2020) - (Yıldız & Arsan, 2011) - (Yaşar & Kalfa, 2012) - (Urbikain & Sala, 2009) - (Tsikaloudaki et al, 2012) - (Ahn et al, 2016) - (Ihm et al, 2012) - (Grynning et al, 2013) - (Aydin & Brounen, 2019) - (Huang et al, 2021)

¹ Solar heat gain coefficient

بهینه نمودن شاخص‌های تاثیرگذار بر مصرف انرژی در ساختمان، از روش‌های مختلفی قابل اجراست؛ برای مثال در پژوهش قلی‌نژاد و همکاران، با اهداف کلی‌تر طراحی اقلیمی به معرفی جهت‌یابی بهینه مسکن در شهر قائمشهر با استفاده از داده‌های اقلیمی، پرداخته است (قلی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۳). برای پژوهش‌ها با اهداف دامنه‌دار و تدوین گر راهکارهای بهینه‌یابی، از فرآیندهای طولانی‌تر بکار برده می‌شود؛ که همین فرآیند، به صورت دو نوع پارامتریک (محدودتر) یا پیرو الگوریتم‌های بهینه‌یابی (گسترده‌تر) دیده شده است. در بخشی از مقاله حدادزادگان و همکاران، متغیرهایی مانند فرم ساختمان، نسبت پنجره به دیوار و سایر شاخص‌ها را در یک مدل پلان پایه اداری در سه شهر تهران، بندرعباس و تبریز، به دو روش پارامتریک و بازه‌بندی شده شاخص‌ها و الگوریتم ژنتیک^۱، مورد بهینه‌سازی قرار داده و نتایج را باهم مقایسه نموده است (حدادزادگان و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۴۸-۲۵۵). به دست آوردن جواب‌های بهینه در پروژه، نهایی‌ترین مزیت بهینه‌یابی نیست؛ زیرا کثرت جواب‌ها در این حالت می‌تواند اطلاعات و مشخصات جدیدی از افراد و جمعیت‌های بهینه و گزینش شده را در اختیار پژوهشگر قرار دهد. این مشخصات نیازمند تحلیل و نگاه جامع‌تری به توابع استخراجی، برای یافتن ارتباطات بین پارامترها است. چون این حوزه، از اساس، مربوط به معادلات پیچیده ریاضی و شبیه‌سازی آن است، قابلیت تعمیم در علوم دیگر را از خود نشان داده و توسط محققان دیگر در رشته‌های مختلف استفاده شده است. در بخش‌هایی از تحقیقات مختلف از علوم دیگر نیز، از روش‌های همبستگی در مقاطع مختلف آن استفاده نموده‌اند؛ به طور مثال می‌توان مقالات ژو و هو^۲ و لی و همکاران را نام برد که در پژوهش‌های خود به ترتیب در حوزه علم مدیریت و فناوری کاربرد کامپیوتر، از روش مذکور بهره برده‌اند (Li et al, 2021 ; Zhou & Hua, 2022). اما به حالت مقیاس کوچکتر بهینه‌یابی، پژوهش اولادی و همکاران وجود دارد که پس از جواب‌های نمونه‌های موردی فرضی حاصل از مدل مولد برنامه‌نویسی شده در محیط گرس‌هاپر، میان شاخص مورد مطالعه تحقیق یعنی اندازه قطعات با بار حرارتی، با آزمون همبستگی، اجرا و تحلیل شد (اولادی و همکاران، ۱۴۰۱: ۷۱).

کمبود یا شکاف در پیشینه پژوهش ممکن است به علت مشکلات مربوط به روش، فقدان تحقیقات درباره مسئله مورد نظر و یا عدم نتایج قاطع تحقیقات قبلی درباره مسئله باشد (مفیدی و مفیدی، ۱۴۰۰، ص ۷۵). حال با توجه به مطالب بیان شده در بخش انتخاب روش و مبانی نظری مرتبط با هدف پژوهش، از خلا‌ها در پژوهش‌های پیشین و رفع آن‌ها در پژوهش حاضر، به شرح زیر می‌باشد:

- انتخاب مولفه بازشو در ضلع جنوبی بنا و تحلیل انرژی آن، به دلیل تاثیر شدت رطوبت در محدوده آسایش حرارتی مناطق معتدل و مرطوب برخی از ماه‌های سال بر مصرف انرژی، اهمیت دارد که در پژوهش‌های محدودی این موضوع بررسی گردیده است.
- انتخاب شاخص‌هایی از مولفه ابعاد و تناسبات بازشو، اکثراً محدود به عرض و ارتفاع پنجره و یا WWR می‌شود و دلیل انتخاب نیز عموماً از تکرار آن در تحقیقات پیشین بوده است؛ در حالی که چالش‌های گوناگونی پیش روی طراح معمار و مجریان است و این نیازمند شاخص‌های متنوع‌تری برای تصمیم‌گیری و انتخاب بهتر، می‌باشد.
- خرد اقلیم، کاربری و اطلاعات طراحی معماری بنا از مسائل پایه در غیرقابل تعمیم کردن نتایج تحقیقات این مباحث هستند و نکات جزئی ولی روش‌مندتر، تاثیرات اساسی بر درستی نتایج اینگونه پژوهش‌ها می‌گذارند.
- همچنین انتخاب و مقایسه مولفه‌ها و پارامترها نیز عموماً به اشکال مفرد و ساده صورت گرفته بدین معنی که روابط و نسبت‌های آن‌ها با یکدیگر کمتر مورد توجه بوده است. این نسبت‌ها و شناخت روابط بینشان می‌تواند درک بهتری از هر پارامتر و انتخاب حالت بهینه در موقعیت‌های مختلف را ممکن کند.
- تحلیل درست نتایج بهینه‌یابی بعد از اجرای این عمل، نقش مهمی در تصمیم‌گیری و ارائه پیشنهادات طراحی دارد؛ که این مورد وابسته به نوع و تعداد جواب‌های بهینه است.

تاثیر بازشو در مصرف انرژی ساختمان

نکته ضروری در فرآیند طراحی برای تعیین درصد بهینه پنجره‌های خارجی، توجه به توپولوژی شهری و ویژگی‌های محیط اطراف ساختمان است. تحقیقات گوناگونی در اقلیم‌های مختلف در مورد تاثیرات بازشوها صورت گرفته است و هر یک برای ارتباط با تامین نیاز گرمایش، به نکاتی دست یافته‌اند. برای مثال برای پایداری ساختمان باید از پنجره‌های کوچک و بزرگ به ترتیب در جبهه شمالی و جنوبی استفاده شود. همچنین در ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد، استفاده از راه حل‌هایی مانند بهره‌گیری از گرمای داخلی تولید شده توسط تجهیزات و افراد، به دست آوردن گرمای خورشیدی و شیشه‌های سه لایه تا حد زیادی اتلاف حرارت را کاهش می‌دهد. استفاده از ابعاد بزرگتر پنجره

^۱ Genetic algorithm

شمالی منجر به افزایش جزئی در بار گرمایشی می شود و از سوی دیگر، پنجره‌های بزرگ‌تر در نمای جنوبی ساختمان، سرعت تهویه را افزایش می‌دهند و باید از سایبان‌ها نیز استفاده شود (Bagheri et al, 2024: 2).

شاید بتوان مهم‌ترین دلیل پیشنهاد منابعی نظیر مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان مبنی بر لزوم کاهش نسبت پنجره به دیوار را، ضریب انتقال حرارت زیاد پنجره‌ها دانست. این در حالی است که دیگر ویژگی‌های پنجره نظیر ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره‌ها می‌تواند با کسب حرارت از خورشید در مواقع نیاز، بر کاهش بار گرمایی ساختمان اثرگذار باشد. بنابراین در زمان انتخاب نوع و مساحت پنجره‌ها، علاوه بر ضریب انتقال حرارت، توجه به ضریب بهره حرارتی خورشیدی پنجره‌ها هم اهمیت دارد. در صورتی که عایق‌کاری حرارتی ساختمان و کاهش ضریب انتقال حرارت پنجره با بی‌توجهی نسبت به ضریب بهره حرارتی پنجره‌ها یا وضعیت سایه‌اندازی آن‌ها همراه شود، ممکن است شرایط بسیار نامطلوبی را از نظر آسایش حرارتی برای ساکنین فراهم آورد، زیرا به دلیل جلوگیری از اتلاف حرارت از طریق جداره‌های خارجی، تابش خورشید در فضاهای داخل در اوقات گرم و حتی معتدل باعث افزایش دما به میزان زیاد شده و ساکنان را به استفاده از وسایل خنک‌کننده ترغیب می‌کند (فلاح، ۱۳۹۸). گاهی اوقات طراحی پنجره را بیشتر از یک مسئله تعیین‌کننده عملکرد نور روز، نتیجه یک سبک معماری می‌دانند. با این حال، طراحی پنجره، عنصر اصلی برای به دست آوردن نور روز، تاثیر بسزایی در دستیابی به راحتی بصری و کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها دارد. بنابراین موقعیت مناسب، مساحت، اندازه، تعداد و شکل پنجره‌ها و ویژگی‌های شیشه در توزیع نور روز و کاهش نیاز به نور مصنوعی حیاتی است (Farivar & Teimourtash, 2023). بدیهی است که تاثیر عوامل داخلی بر عملکرد تهویه طبیعی برای ساختمان‌های مسکونی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای هدایت باد به مسیر دلخواه درون ساختمان باید با عوامل موثر در هدایت جریان آشنا شد که از مهم‌ترین آن‌ها عبارتست از موقعیت پنجره‌ها در نما، وضعیت بازشوی پنجره‌ها، وضعیت و شکل سایبان‌ها و سایر ملحقات پنجره. از آنجایی که مردم زمان زیادی را در خانه‌های خود می‌گذرانند تهویه هوای داخل به جهت افزایش کیفیت هوا در سطح جهانی مهم در نظر گرفته می‌شود. بهبود کیفیت هوای داخلی و به تبع آن آسایش حرارتی داخل ساختمان بوسیله تهویه طبیعی به عواملی چون جریان هوا، درجه حرارت داخل و خارج ساختمان‌های اطراف و از همه مهم‌تر تناسبات بازشو بستگی دارد جدا از کنترل میزان تهویه توسط بازشوها، نوع بازشو ترکیب آن‌ها میزان گشودگی ابعاد و تناسبات بازشو تاثیر شگرفی بر عملکرد تهویه طبیعی خواهد داشت (پورموسی و همکاران، ۱۳۹۹).

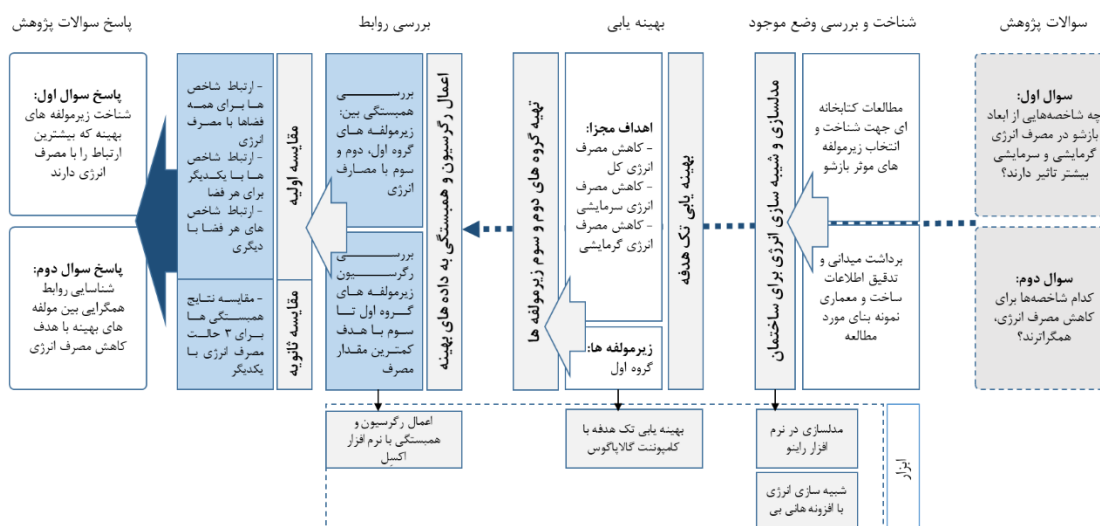
مواد و روش تحقیق

نوع تحقیق در پژوهش حاضر، کاربردی است و طبق تعریف و دسته بندی راهبرد پژوهش ترکیبی گروت (گروت و وانگ، ۱۳۹۶: ۳۶۱)، به جهت اعمال چند راهبرد در گام‌های پیوسته، در نوع دوگانه قرار می‌گیرد. تنظیم این گام‌ها برای پاسخ به سوالات پژوهش شامل چهار مرحله می‌باشد که به لحاظ پاسخ نهایی به هر دو سوال، این مورد فقط در مرحله آخر صورت می‌گیرد.

مرحله اول صرفاً برای شناسایی شاخص‌های موثر ابعاد و تناسبات بازشو از طریق تحلیل و بررسی پژوهش‌های گذشته در حوزه بهینه سازی مصرف انرژی این جزء از بنا بوده است. گروه اول شاخص‌ها و پایه متغیرهای مستقل در این پژوهش شامل سه شاخص عرض و ارتفاع پنجره، WWR و ارتفاع کف داخلی بنا از لبه پایین پنجره است که از جمله موثرترین عوامل در مصرف انرژی و طراحی اقلیمی می‌باشد. همچنین دو گروه دیگر نیز منشعب از گروه اول شاخص‌ها برای بُعد تناسبات در نظر گرفته شد.

در مرحله دوم، برداشت میدانی و مدل‌سازی نمونه بنای متداول مسکونی معاصر روستایی واقع در شهرستان رودسر، با توجه به وضع موجود در نرم‌افزار راینو ترسیم شد و شبیه‌سازی انرژی در محیط گرس‌هاپر و با افزونه هانی‌بی انجام گرفت. همچنین در مراحل شبیه‌سازی تمامی نمونه‌ها، برنامه‌دهی زمانی، طبق مبحث ۱۹ مقررات ملی و خصوصیات مصالح، از وضع موجود تنظیم گردید.

در مرحله سوم، برای بهینه‌یابی تک‌هدفه از کامپوننت گالاپاگوس در محیط گرس‌هاپر با اهداف سه حالت مصرف انرژی کل، سرمایشی و گرمایشی و در سه گروه شاخص‌های تعیین شده، استفاده شد؛ بدین صورت که با ثابت نگهداشتن سایر مولفه‌ها در مدل و پارامتریک نمودن شاخص‌های ارتفاع، عرض و OKB پنجره از طریق بازه‌بندی‌های نزدیک به وضع موجود، برای تنظیمات ورودی دستور بهینه‌یابی تنظیم شد. در مرحله آخر و برای پاسخ به سوالات تحقیق، نتایج بهینه‌یابی‌ها برای بررسی روابط متغیرها با یکدیگر به وسیله دستورات رگرسیون خطی و همبستگی در نرم افزار اکسل اعمال شد تا همگرایی‌ها و تاثیرات هر یک از متغیرهای مستقل در مسیر سه حالت مصرف انرژی مشخص گردد. همچنین از نتایج همبستگی‌ها، مقایسه‌ای میان شاخص‌های بازشوی هر یک از فضاها میان حالت‌های مصرف انرژی انجام گرفت تا شدت و ضعف‌های این مصارف نسبت به یکدیگر نیز سنجیده شود (تصویر ۱).



تصویر ۱- چهارچوب عملکردی پژوهش

بحث و ارائه یافته‌های تحقیق

وضع موجود

بنای نمونه مورد مطالعه از بناهای مسکونی روستای حسین آباد شهرستان رودسر، با شیوه ساخت متداول این منطقه انتخاب گردیده است. این خانه با جهت‌گیری شمال شرقی-جنوب غربی و مساحت ۱۴۳/۴۵ مترمربع دارای WWR ۱۰ تا ۲۰ درصد، مصالح غیرستنی و جدید، سقف شیبدار دو پوسته، یک طبقه و یک تا ۲۰ درصد نسبت فضای نیمه باز به بسته دارد. مدل‌سازی نمونه با توجه به وضع موجود در راینو ترسیم گردید و شبیه‌سازی انرژی در محیط گرس‌هاپر و با افزونه هانی‌بی انجام شد. ورودی‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی انرژی شامل تنظیم ژئومتری بنا، برنامه زمانی، مشخصات مصالح و تاسیسات گرمایشی و سرمایشی هستند. برنامه زمانی برای تجهیزات، حضور افراد، آب گرم مصرفی، تاسیسات گرمایش و سرمایش و روشنایی از پیوست‌های مورد نظر در مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان استفاده گردیده است. برای مصالح نیز از کاتالوگ‌های شرکت‌های مصالح ساختمان و پیوست ۷ مبحث ۱۹ بهره گرفته شده است. در آخر نیز خروجی شدت مصرف انرژی در یکسال برای مجموع انرژی و اقسام آن توسط کامپونت موتور انرژی پلاس ارائه شد. طبق خروجی‌های گرافیکی از کامپونت انرژی پلاس، سطوح و اجزاء تحت‌تاثیر دما و انرژی مقایسه شد و مشخص است که پنجره‌های جنوبی، دارای بیشترین اثربخشی هستند. این به دلیل تابش مستقیم خورشید در بیشتر طول سال می‌باشد که می‌تواند ضمن تامین نور طبیعی فضاها را مرتبط، اجزاء و مصالح درون بنا را تحت‌تاثیر قرار دهد (جدول ۲).

جدول ۲- مصرف انرژی و مشخصات نمونه شماره ۶۲

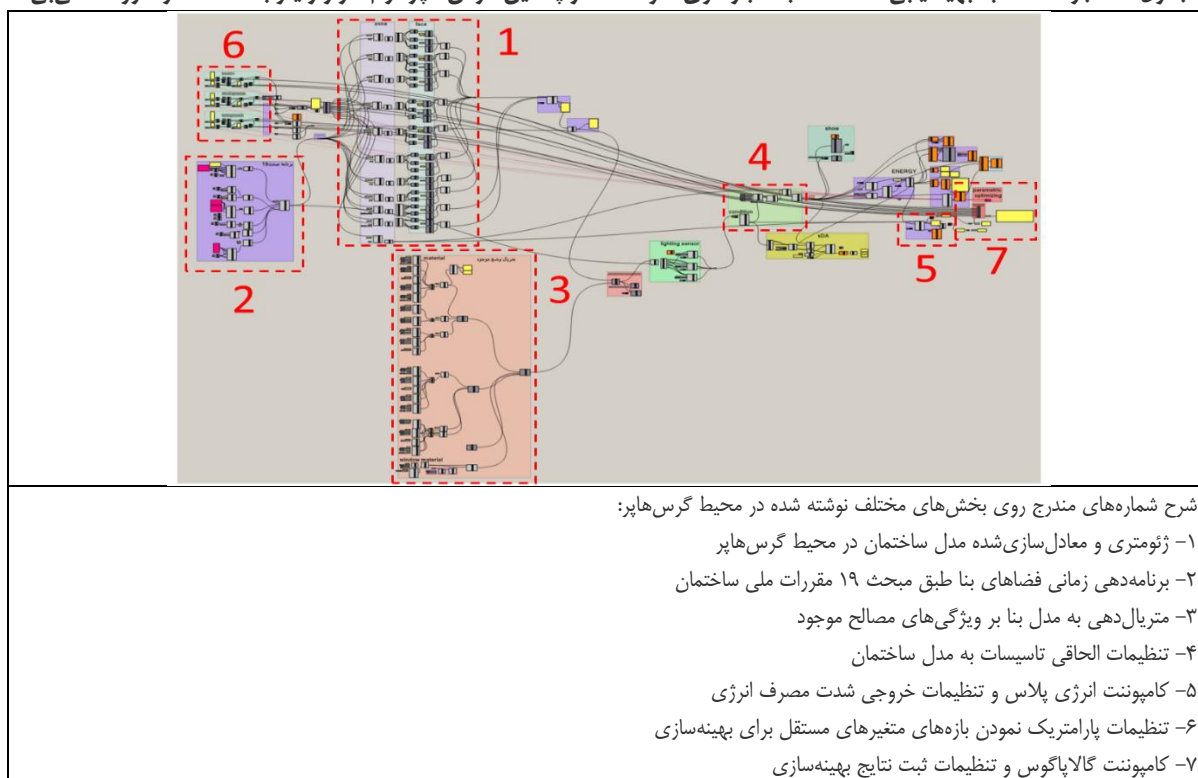
شماره نمونه	۶۲	پرسپکتیو جنوبی	پرسپکتیو شمالی
جهت	شمال شرقی-جنوب غربی		
چیدمان فضا			
مصرف انرژی سالانه	۱۷۲.۴۰	انرژی	

بهینه‌یابی تک‌هدفه

ورودی‌های بهینه‌سازی

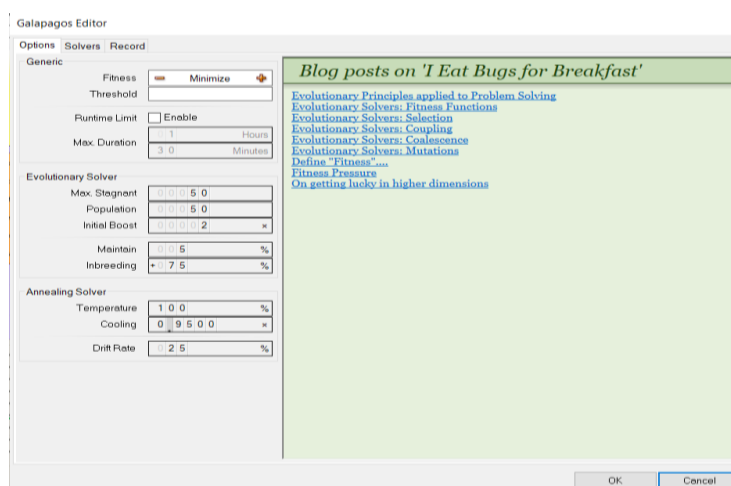
بازه تغییرات شاخص‌ها با توجه به ابعاد و اندازه‌های متداول اجرا شده در بناها تعیین شده و برای درجه‌بندی از موارد مشابه در تحقیقات گذشته استفاده شد. اضافه و کم شدن درجه‌ها در ارتفاع و عرض پنجره با توجه به ابعاد دیوار فضای مورد نظر بوده است تا خطاهای ناشی از خروجی حالت‌های مورد بررسی در نرم‌افزار کاهش یابد. اگر ابعاد پنجره از آنچه که مربوط ابعاد دیوار مورد نظر آن است بیشتر باشد و به فضای بیرون از سطح دیوار برود، نتیجه خروجی انرژی این حالت null ثبت می‌شود؛ لذا هنگام درجه‌بندی همه ابعاد، ماکسیمم اندازه‌ها را بررسی نموده و حالتی که ممکن است نتیجه را null کند حذف می‌کنیم. ضمناً مقادیر را از لبه مماس صفر بنا شروع نمی‌کنیم زیرا مجدد خطا را در نتایج وارد می‌کند به همین خاطر با فاصله ۱۰ سانتی‌متری از هر لبه سطوح بازشوها را تنظیم می‌کنیم (جدول ۳).

جدول ۳- اجزاء محاسبه بهینه‌یابی تک‌هدفه ابعاد بازشوی نمونه ۶۲ در پلاگین گرس‌هاپر نرم افزار راینو با استفاده از افزونه هانی‌بی



خروجی‌های بهینه‌سازی

پس از جاگذاری تنظیمات ورودی ذکر شده، بهینه‌سازی برای حالت‌های همزمان متغیرها با استفاده از کامپوننت گالاپاگوس انجام شد که همه این موارد از کامپوننت‌های موجود در گرس‌هاپر بودند. متغیر مستقل پژوهش حاضر به عنوان ورودی‌های گالاپاگوس به تعداد ۹ بازه عددی (برای هر پنجره سه متغیر عرض، ارتفاع و OKB) در نظر گرفته شد و برای قسمت ورودی هدف مسئله نیز خروجی شدت مصرف انرژی، سرمایش و گرمایش در سه مرتبه به طور جداگانه وارد شد. در بخش تنظیمات گالاپاگوس نیز دنبال‌کننده هدف بر روی کمترین حد و تا حداکثر ۵۰ نسل و در هر نسل ۵۰ فرد به عنوان شرایط بهینه‌یابی تعیین شد (تصویر ۲).



تصویر ۲- تنظیمات کامپوننت گالاپاگوس برای بهینه‌یابی بازه‌ها

اتصال خروجی‌ها به کامپوننت گالاپاگوس و ثبت‌کننده‌ها به طور جداگانه یکبار به خروجی مجموع انرژی و دفعات بعدی، با سرمایش و گرمایش به طور مستقل انجام شد.

بررسی رفتار شاخص‌های بازشو در کل حالت‌های مصرف انرژی

برای شناخت، مقایسه و کشف درست روابط شاخص‌ها و بر حسب درجه اهمیتشان در پژوهش‌های گذشته، در این اینجا به سه گروه تقسیم شدند که گروه اول شاخص‌های ساده و اصلی شامل عرض و ارتفاع پنجره و OKB و WWR است. گروه دوم و سوم مربوط به نسبت شاخص‌های اصلی با یکدیگرند که مربوط به نسبت عرض به ارتفاع، نسبت عرض به OKB و نسبت ارتفاع به OKB است. در گروه سوم نیز نسبت‌ها با کمی پیچیدگی، شامل نسبت مساحت پنجره‌ها به OKB و نسبت WWR به میانگین OKB می‌باشند. این گروه‌بندی در سایر مصارف انرژی گرمایشی و سرمایشی نیز تکرار می‌شود. هر یک از این شاخص‌ها به جهت روانی در خوانش سریع الگوریتم‌های نرم‌افزاری، جدوال و نمودارها به صورت اختصاری نمایش داده شده‌اند (جدول ۴).

جدول ۴- معرفی گروه‌بندی شاخص‌های موثر

گروه اول		گروه دوم		گروه سوم	
L-s-bed01	عرض پنجره جنوبی اتاق خواب	L/H1	نسبت عرض به ارتفاع پنجره اتاق خواب	(L*H)/O1	نسبت مساحت پنجره اتاق خواب به OKB
H-s-bed01	ارتفاع پنجره جنوبی اتاق خواب	L/H2	نسبت عرض به ارتفاع پنجره نشیمن	(L*H)/O2	نسبت مساحت پنجره نشیمن به OKB
OKB-s-bed01	اندازه کف بنا تا لبه پایینی پنجره جنوبی اتاق خواب	L/H3	نسبت عرض به ارتفاع پنجره پذیرایی	(L*H)/O3	نسبت مساحت پنجره پذیرایی به OKB
L-s-din	عرض پنجره جنوبی نشیمن	L/O1	نسبت عرض به OKB اتاق خواب	WWR/AVE- O	نسبت WWR به میانگین OKB
H-s- din	ارتفاع پنجره جنوبی نشیمن	L/O2	نسبت عرض به OKB نشیمن		
OKB-s- din	اندازه کف بنا تا لبه پایینی پنجره جنوبی نشیمن	L/O3	نسبت عرض به OKB پذیرایی		
L-s-liv	عرض پنجره جنوبی پذیرایی	H/O1	نسبت ارتفاع به OKB اتاق خواب		
H-s- liv	ارتفاع پنجره جنوبی پذیرایی	H/O2	نسبت ارتفاع به OKB نشیمن		
OKB-s- liv	اندازه کف بنا تا لبه پایینی پنجره جنوبی پذیرایی	H/O3	نسبت ارتفاع به OKB پذیرایی		

طبق میانگین خروجی داده‌های ثبت شده از شدت مصرف تفکیک‌شده انرژی به جز سرمایش و گرمایش، مجموعاً در حدود ۸۶/۶۱ کیلووات ساعت بر متر مربع در سال می‌باشد؛ این میزان به ازای هر نوع انرژی مصرفی روشنایی، وسایل و تجهیزات و آب گرم به ترتیب در حدود ۲۷/۷۱، ۳۵/۰۴، ۲۳/۸۶ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال است.

رگرسیون

برای روشن شدن میزان تاثیرگذاری هر کدام از متغیرهای مستقل، محاسبه رگرسیون خطی از تمام تعداد داده مربوط به حالت‌های بهینه‌یابی شده انجام گرفت؛ به این ترتیب که ستون اندازه‌های شاخص‌های گروه اول، دوم و سوم به عنوان متغیرهای مستقل و ستون مقادیر مصرف انرژی در سه حالت مصرف انرژی کل، مصرف انرژی سرمایشی و گرمایشی که در ادامه بررسی‌ها آمده است به عنوان متغیر وابسته برای جواب‌های بهینه‌یابی از خروجی‌های اکسل انتخاب شدند.

در هر سه حالت مصرف انرژی، ضریب همبستگی (Multiple R) در سه گروه شاخص‌ها، بالای ۸۰ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین داده‌هاست. همچنین ضریب دترمینان (R Square) در مجموع برای هر سه گروه شاخص‌ها بالای ۷۰ درصد است و به این معناست که به همین میزان، متغیرهای وابسته توسط متغیرهای مستقل، تعریف می‌شوند. مقدار Significance F نیز برای هر سه گروه، کمتر از ۰/۰۵ است که بیان‌کننده معنی‌داری آماری رابطه داده‌هاست. مقدار P برای همه متغیرها برابر با صفر و یا نزدیکی بسیار زیاد به صفر را دارد و نشان‌دهنده تصادفی نبودن نتایج است (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج مستخرج از رگرسیون خطی حالت‌های بهینه‌یابی شده با اهداف سه حالت مصرف انرژی

اولویت متغیرهای گروه اول بر اساس میانگین ضرایب تاثیرگذاری همه فضاها				Multiple R (ضریب همبستگی)			R Square (ضریب دترمینان)			P-value (برای هر سه گروه شاخص‌ها)	SF (برای هر سه گروه شاخص‌ها)	تعداد داده‌ها	حالت‌های مصرف انرژی
اولویت اول	اولویت دوم	اولویت سوم	اولویت چهارم	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم				
WWR	L	H	OKB	۹۷	۸۵	۹۳	۸۷	۷۳	۹۴	نزدیک به صفر	کمتر از ۰/۰۵	۲۶۰۳	کل مصرف انرژی
WWR	H	L	OKB	۹۹	۸۹	۹۷	۹۴	۸۰	۹۹	نزدیک به صفر	کمتر از ۰/۰۵	۲۹۸۱	انرژی سرمایشی
WWR	L	H	OKB	۹۹	۸۷	۹۷	۹۴	۷۶	۹۹	نزدیک به صفر	کمتر از ۰/۰۵	۲۶۳۲	انرژی گرمایشی

SF: Significance F

همبستگی در کل مصرف

تنها معیار متداول اندازه‌گیری تغییرات توام متغیرهای فاصله‌ای یا نسبی، ضریب همبستگی گشتاوری است که به افتخار ابداع‌کننده آن، کارل پیرسون، به ضریب همبستگی (گشتاوری) پیرسون معروف شده است. مقدار این ضریب همواره بین ۱- تا ۱+ متغیر است و شدت رابطه و علامت آن جهت تغییرات توام دو متغیر فاصله‌ای یا نسبی را نشان می‌دهد. مقدار یک به معنای همبستگی کامل و علامت + و - آن به ترتیب به معنای تغییرات مستقیم و معکوس و مقدار صفر به معنای عدم وجود همبستگی خطی بین دو متغیر است (بامنی مقدم، ۱۳۹۰: ۳۷۲) (جدول ۶).

جدول ۶- یک الگوی طبقه‌بندی شده کلی برای تفسیر مقدارهای همبستگی پیرسون

شدت رابطه	مقدار ضریب همبستگی پیرسون
رابطه (همبستگی) خیلی ضعیف	۰/۱۹۹۹ تا ±۰/۰۰۰
رابطه (همبستگی) ضعیف	۰/۳۹۹۹ تا ±۰/۲۰
رابطه (همبستگی) متوسط	۰/۵۹۹۹ تا ±۰/۴۰
رابطه (همبستگی) قوی	۰/۷۹۹۹ تا ±۰/۶۰
رابطه (همبستگی) خیلی قوی	±۱ تا ±۰/۸۰

همبستگی خیلی قوی: رابطه همبستگی میان WWR و مصرف انرژی، دارای مقدار ۰/۹۱۶ است که در محدوده رابطه خیلی قوی مثبت قرار دارد و به این معناست که با افزایش این شاخص، مصرف انرژی نیز به حد زیادی بالا می‌رود. رابطه نسبت عرض به ارتفاع در اتاق خواب با

نسبت عرض به OKB در همان فضا، به مقدار ۰.۸۱۲ بوده که در ماتریس گروه دوم بیشترین مقدار همبستگی مثبت است. همبستگی میان مصرف انرژی با نسبت مساحت به OKB اتاق خواب و نسبت WWR به OKB، به ترتیب معادل ۰/۸۰۰ و ۰/۸۷۳ با بیشترین همبستگی برای گروه سوم شاخص‌ها است.

همبستگی قوی: رابطه عرض پنجره اتاق خواب و پذیرایی با مصرف انرژی به ترتیب به مقدار ۰/۷۱۴ و ۰/۶۱۹ است که بعد از WWR بیشترین همبستگی را با مصرف انرژی دارند. همچنین رابطه عرض پنجره با WWR، به مقدار ۰.۶۶۳ نیز از نوع همبستگی مثبت می‌باشد که یعنی هرچه عرض پنجره کاهش یابد، اندازه WWR نیز به این نوع رابطه قوی، پایین خواهد رفت. مقدار همبستگی قوی در گروه دوم میان نسبت عرض پنجره به OKB اتاق خواب با مصرف انرژی، نسبت عرض به ارتفاع نشیمن با نسبت عرض به OKB همان فضا و نسبت عرض به ارتفاع با نسبت عرض به OKB پذیرایی به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۶۵۰، ۰/۷۶۳ و ۰/۷۷۰ و جهت مثبت است. رابطه نسبت WWR به OKB با نسبت مساحت پنجره به OKB هر سه فضا، به ترتیب معادل ۰/۶۱۹، ۰/۶۰۴ و ۰/۷۳۳ با جهت مثبت قرار دارد.

همبستگی متوسط: همبستگی میان عرض پنجره نشیمن با مصرف انرژی و رابطه میان WWR با عرض پنجره اتاق خواب و نشیمن از نوع متوسط بوده که مقدار آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۴۷۰، ۰/۵۴۴ و ۰/۴۹۶ است و با کاهش یا افزایش شان، تاثیر با شدت متوسط و مثبتی بر یکدیگر خواهند داشت. در گروه دوم، رابطه میان مصرف انرژی با نسبت عرض به ارتفاع پنجره پذیرایی، نسبت عرض به OKB نشیمن با همین نسبت برای فضای پذیرایی، نسبت عرض به ارتفاع و ارتفاع به OKB برای فضای نشیمن و همین رابطه برای اتاق خواب دارای همبستگی در بازه متوسط و به ترتیب با مقادیر ۰/۴۱۹، ۰/۴۰۰، ۰/۵۵۹، ۰/۴۳۸ و ۰/۴۱۶ هستند؛ عدد آخر نوع منفی را داراست که یعنی با افزایش نسبت عرض به ارتفاع، مقدار نسبت ارتفاع به OKB به میزان متوسطی کاهش می‌یابد.

سایر همبستگی‌های قابل توجه: میان مصرف انرژی و WWR با ارتفاع پنجره‌های هر سه فضا، رابطه همبستگی با شدت ضعیف و مثبت وجود دارد. رابطه میان عرض پنجره فضاها با یکدیگر نیز به مقدار ضعیف تا خیلی ضعیف دارد که در همه موارد رابطه مثبت می‌باشد. همبستگی میان انرژی و نسبت‌های عرض به ارتفاع نشیمن و ارتفاع به OKB های هر سه فضا و رابطه نسبت عرض به ارتفاع اتاق خواب با نسبت عرض به ارتفاع و عرض به OKB پذیرایی از جمله روابط ضعیف تا خیلی ضعیف گروه دوم هستند. در گروه سوم نیز رابطه نسبت مساحت پنجره به OKB با همین نسبت برای فضاهای نشیمن و پذیرایی، دارای همبستگی ضعیف مثبت است.

جدول ۷- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه اول در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی کل

	L-s-bed01	OKB-s-bed01	H-s-bed01	L-s-din	OKB-s-din	H-s-din	L-s-liv	OKB-s-liv	H-s-liv	wwr	load
L-s-bed01	1										
OKB-s-bed01	-0.000169	1									
H-s-bed01	-0.040776	-0.06215	1								
L-s-din	0.1753433	-0.03219	0.041297	1							
OKB-s-din	-0.021407	-0.09842	-0.02808	-0.04203	1						
H-s-din	0.0304395	-0.04011	-0.07105	-0.04773	-0.05092	1					
L-s-liv	0.292121	-0.04662	0.025823	0.191529	-0.00281	0.04145	1				
OKB-s-liv	-0.044783	-0.09667	-0.07826	-0.01273	-0.01729	-0.09827	-0.0312	1			
H-s-liv	0.052437	-0.06443	-0.06277	-0.03949	-0.05912	-0.00345	-0.0268	-0.05697	1		
wwr	0.544383	-0.04281	0.243212	0.495235	-0.01452	0.27004	0.663041	-0.06366	0.253787	1	
load	0.7145125	-0.0188	0.296156	0.47058	0.00248	0.203646	0.619413	-0.03321	0.250722	0.916609	1

جدول ۸- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه دوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی کل

	L/H1	L/H2	L/H3	L/O1	L/O2	L/O3	H/O1	H/O2	H/O3	load
L/H1	1									
L/H2	0.02934	1								
L/H3	0.175599	0.072985	1							
L/O1	0.812415	0.062753	0.238298	1						
L/O2	0.083479	0.763381	0.117288	0.125691	1					
L/O3	0.203548	0.077262	0.770077	0.255647	0.134615	1				
H/O1	-0.4161	0.043288	0.019938	0.066616	0.025711	0.021173	1			
H/O2	-0.06221	0.438983	-0.03316	-0.04144	-0.14323	-0.05633	0.050067	1		
H/O3	-0.01882	-0.04169	-0.4407	-0.03405	-0.02272	0.074716	-0.01713	-0.0479	1	
load	0.384242	0.243987	0.419281	0.650316	0.400404	0.559641	0.242765	0.19952	0.144731	1

جدول ۹- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه سوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی کل

	(L*H)/O1	(L*H)/O2	(L*H)/O3	WWR/AVE- O	load
(L*H)/O1	1				
(L*H)/O2	0.155535	1			
(L*H)/O3	0.166892	0.146898	1		
WWR/AVE- O	0.619126	0.604081	0.733762	1	
load	0.800806	0.435891	0.525191	0.873928	1

روابط مصرف انرژی سرمایشی

همبستگی خیلی قوی: در گروه اول، رابطه WWR به مصرف انرژی، معادل ۰.۹۹۴ با جهت منفی است که هرچه WWR افزایش یابد، کاهش مصرف انرژی با شدت خیلی قوی رخ می‌دهد. روابط خیلی قوی گروه سوم شامل رابطه مصرف انرژی با نسبت WWR به میانگین OKB و نسبت مساحت پنجره به OKB پذیرایی با همگرایی منفی به ترتیب به مقدار ۰/۹۶۴ و ۰/۸۲۲ و رابطه نسبت WWR به میانگین OKB با نسبت مساحت به OKB پنجره پذیرایی به مقدار ۰/۸۱۶ در جهت مثبت است. روابط خیلی قوی در گروه دوم شامل رابطه معکوس نسبت ارتفاع پنجره به OKB پذیرایی با مصرف انرژی و با نسبت عرض به ارتفاع و رابطه مثبت نسبت عرض به ارتفاع اتاق خواب به نسبت عرض به OKB آن فضا؛ مقادیر این همبستگی‌ها به ترتیب شامل ۰/۶۷۳، ۰/۶۲۸ و ۰/۶۵۱ است.

همبستگی قوی: عرض پنجره نشیمن و پذیرایی و ارتفاع آن‌ها با مصرف انرژی رابطه معکوس دارند و مقدار همبستگی آن‌ها به ترتیب معادل ۰/۶۰۹، ۰/۶۷۸، ۰/۶۶۴ و ۰/۷۴۲ است. همبستگی میان نسبت مساحت به OKB نشیمن با مصرف انرژی در جهت منفی و با نسبت WWR به میانگین OKB در جهت مثبت است که مقدارشان به ترتیب برابر ۰/۷۲۸ و ۰/۷۳۷ می‌باشد.

همبستگی متوسط: همبستگی متوسط در گروه دوم، روابط بیشتری را شامل شده است مهم‌ترین آن رابطه معکوس مصرف انرژی با نسبت ارتفاع به OKB نشیمن و با نسبت عرض به OKB پذیرایی، به ترتیب معادل مقادیر ۰/۵۳۰ و ۰/۵۸۸ است. برخی دیگر شامل رابطه نسبت عرض به OKB پذیرایی و نشیمن با نسبت ارتفاع به OKB همان فضاها بطور متناظر است که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۰/۵۰۸ و ۰/۴۱۹ در جهت مثبت است. رابطه نسبت عرض به ارتفاع برای اتاق خواب و نشیمن با نسبت ارتفاع به OKB از همان فضاهای ذکر شده نیز جزو همبستگی متوسط می‌باشد.

سایر همبستگی‌های قابل توجه: از جمله روابط معکوس دیگر گروه اول شامل رابطه مصرف انرژی با عرض پنجره اتاق خواب، رابطه ارتفاع پنجره پذیرایی با OKB پذیرایی و اتاق خواب و با عرض و ارتفاع پنجره اتاق خواب می‌باشد. اما رابطه از نوع مثبت این گروه مانند رابطه WWR با عرض و ارتفاع پنجره اتاق خواب و عرض نشیمن با عرض و ارتفاع اتاق خواب است. رابطه مصرف انرژی با نسبت ارتفاع به OKB و نسبت عرض به OKB اتاق خواب در جهت منفی است اما مصرف انرژی با نسبت عرض به ارتفاع پذیرایی رابطه متوسط مثبت دارد. از دیگر همبستگی‌های متوسط گروه دوم می‌توان رابطه نسبت ارتفاع به OKB پذیرایی با نسبت‌های عرض و ارتفاع به OKB نشیمن نام برد. از جمله روابط ضعیف یا خیلی ضعیف گروه سوم، رابطه مصرف انرژی با نسبت مساحت پنجره به OKB اتاق خواب با همبستگی منفی و رابطه نسبت مساحت پنجره به OKB پذیرایی با همین نسبت در دو فضای دیگر و در جهت مثبت می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه اول در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی سرمایه‌یابی

	<i>L-s-bed01</i>	<i>OKB-s-bed01</i>	<i>H-s-bed01</i>	<i>L-s-din</i>	<i>OKB-s-din</i>	<i>H-s-din</i>	<i>L-s-liv</i>	<i>OKB-s-liv</i>	<i>H-s-liv</i>	<i>wwr</i>	<i>load</i>
<i>L-s-bed01</i>	1										
<i>OKB-s-bed01</i>	0.124325	1									
<i>H-s-bed01</i>	0.255576	-0.05024	1								
<i>L-s-din</i>	0.141597	-0.06235	0.118635	1							
<i>OKB-s-din</i>	0.108368	0.038067	0.09668	-0.07607	1						
<i>H-s-din</i>	-0.00417	-0.06603	0.038155	0.306784	-0.04134	1					
<i>L-s-liv</i>	-0.06856	-0.06433	0.031837	0.36409	-0.05843	0.367949	1				
<i>OKB-s-liv</i>	0.059103	0.058949	-0.05323	-0.0349	-0.01005	-0.06074	-0.12041	1			
<i>H-s-liv</i>	-0.18203	-0.1095	-0.0537	0.315595	-0.04411	0.273645	0.352406	-0.10434	1		
<i>wwr</i>	0.238403	-0.09905	0.25421	0.682473	-0.00122	0.585336	0.67372	-0.08216	0.697692	1	
<i>load</i>	-0.26178	0.107082	-0.19698	-0.60928	0.01831	-0.66439	-0.67867	0.090304	-0.74211	-0.99471	1

جدول ۱۱- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه دوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی سرمایه‌یابی

	<i>L/H1</i>	<i>L/H2</i>	<i>L/H3</i>	<i>L/O1</i>	<i>L/O2</i>	<i>L/O3</i>	<i>H/O1</i>	<i>H/O2</i>	<i>H/O3</i>	<i>load</i>
<i>L/H1</i>	1									
<i>L/H2</i>	0.040123	1								
<i>L/H3</i>	-0.03228	0.02991	1							
<i>L/O1</i>	0.651062	0.085165	0.04112	1						
<i>L/O2</i>	0.108973	0.383183	-0.05362	0.132602	1					
<i>L/O3</i>	-0.05543	-0.0585	0.209377	-0.11769	-0.261481	1				
<i>H/O1</i>	-0.43488	0.034244	0.062815	0.284952	0.061798	0.119009	1			
<i>H/O2</i>	0.03999	-0.56955	-0.04812	0.000536	0.419541	0.270687	-0.01176	1		
<i>H/O3</i>	-0.00959	-0.02792	-0.62812	-0.02478	0.234531	0.508207	0.041028	0.204047	1	
<i>load</i>	-0.05045	0.082108	0.288654	-0.21013	-0.59438	-0.5886	-0.2356	-0.53084	-0.672	1

جدول ۱۲- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه سوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی سرمایه‌یابی

	<i>(L*H)/O1</i>	<i>(L*H)/O2</i>	<i>(L*H)/O3</i>	<i>WWR/AVE-O</i>	<i>load</i>
<i>(L*H)/O1</i>	1				
<i>(L*H)/O2</i>	0.1148	1			
<i>(L*H)/O3</i>	0.118815	0.348373	1		
<i>WWR/AVE-O</i>	0.335319	0.73715	0.816871	1	
<i>load</i>	-0.24918	-0.72815	-0.82246	-0.96438	1

روابط مصرف انرژی گرمایشی

همبستگی خیلی قوی: در گروه اول شاخص‌ها، میان مصرف انرژی و WWR همبستگی زیاد در جهت مثبت و معادل ۰/۹۹۹ وجود دارد که این تکرار نوع رابطه، در مصارف انرژی سرمایشی و کل برای شاخص WWR قابل مشاهده بوده است. رابطه مصرف انرژی با نسبت WWR به میانگین OKB و نسبت مساحت پنجره و به OKB پذیرایی و دو شاخص آخر با یکدیگر، به ترتیب به مقادیر ۰/۹۷۰، ۰/۸۴۸ و ۰/۸۶۶ با همگرایی مثبت خیلی قوی می‌باشد.

همبستگی قوی: مصرف انرژی گرمایشی با عرض پنجره پذیرایی و اتاق خواب و WWR با عرض پنجره پذیرایی و اتاق خواب دارای رابطه قوی و مثبت همبستگی می‌باشد که مقادیر آن به ترتیب برابر ۰/۷۲۴، ۰/۶۴۸، ۰/۷۵۴ و ۰/۶۴۶ است. در گروه دوم رابطه مصرف انرژی با نسبت عرض به OKB اتاق خواب و پذیرایی و رابطه نسبت عرض به OKB پذیرایی، اتاق خواب و نشیمن با نسبت عرض به ارتفاع هر فضا با خود، همگی با همبستگی مثبت، به ترتیب معادل ۰/۶۱۵، ۰/۷۲۵، ۰/۷۶۹، ۰/۷۷۹ و ۰/۷۱۰ است. همبستگی برای مصرف انرژی با نسبت مساحت به OKB اتاق خواب برابر ۰/۷۵۷ و نسبت WWR به OKB با نسبت مساحت به OKB اتاق خواب و نشیمن به ترتیب برابر ۰/۶۳۱ است و ماتریس آن، همگرایی مثبت این شاخص‌ها را با یکدیگر نشان می‌دهد.

همبستگی متوسط: عرض پنجره پذیرایی و اتاق خواب با یکدیگر، WWR و مصرف انرژی گرمایشی با عرض نشیمن، به ترتیب دارای مقدار همبستگی ۰/۴۵۱، ۰/۴۹۶ و ۰/۴۸۱ و رابطه ای در جهت مثبت دارند. مقدار همبستگی رابطه نسبت عرض به OKB اتاق خواب با همین نسبت برای فضای پذیرایی معادل ۰/۴۳۸ از گروه دوم شاخص‌ها می‌باشد. مصرف انرژی با نسبت مساحت به OKB نشیمن و رابطه نسبت مساحت به OKB اتاق خواب با همین نسبت از پذیرایی دارای همبستگی مثبت و به ترتیب معادل ۰/۵۶۷ و ۰/۴۹۹ از گروه سوم است.

سایر همبستگی‌های قابل توجه: رابطه مصرف انرژی با ارتفاع پنجره و با OKB هر سه فضا دارای همبستگی ضعیف می‌باشد اما در شاخص ارتفاع، رابطه جهت مثبت و در OKB، جهت منفی است. همین نوع ارتباط برای شاخص WWR نیز صادق است به این معنی که به جای مصرف انرژی در رابطه بالا، WWR را می‌توان جایگزین نمود. روابط ضعیف و خیلی ضعیف نیز برای سایر شاخص‌های گروه اول وجود دارد اما در بالا به مهم‌ترین آن‌ها اشاره شد. رابطه مصرف انرژی با نسبت عرض به ارتفاع و نسبت ارتفاع به OKB همه فضاها به همراه رابطه نسبت ارتفاع به OKB پذیرایی به نسبت عرض به OKB همه فضاها، دارای همبستگی از نوع ضعیف و مثبت برای شاخص‌ها گروه دوم هستند. همین نوع همبستگی برای گروه سوم در نسبت مساحت پنجره به OKB نشیمن با همین نسبت برای فضاهای پذیرایی و اتاق خواب مشاهده شده است.

جدول ۱۳- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه اول در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی گرمایشی

	L-s-bed01	OKB-s-bed01	H-s-bed01	L-s-din	OKB-s-din	H-s-din	L-s-liv	OKB-s-liv	H-s-liv	wwr	load
L-s-bed01	1										
OKB-s-bed01	-0.06127	1									
H-s-bed01	0.02272	-0.03703	1								
L-s-din	0.23198	-0.10066	-0.0025	1							
OKB-s-din	-0.11415	0.16719	0.02892	-0.14065	1						
H-s-din	-0.00251	-0.02925	-0.0422	0.00377	0.02019	1					
L-s-liv	0.41524	-0.11211	0.13641	0.29670	-0.14495	0.06094	1				
OKB-s-liv	-0.08503	0.14139	-0.02175	-0.07871	0.12028	-0.03063	-0.07307	1			
H-s-liv	0.09585	-0.03815	-0.04543	0.04173	-0.02745	0.06776	0.07656	-0.0776	1		
wwr	0.64628	-0.10652	0.30006	0.49624	-0.13486	0.22210	0.75470	-0.1135	0.32272	1	
load	0.64840	-0.10217	0.31112	0.48157	-0.13062	0.21512	0.74232	-0.1123	0.32019	0.99918	1

جدول ۱۴- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه دوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی گرمایشی

	L/H1	L/H2	L/H3	L/O1	L/O2	L/O3	H/O1	H/O2	H/O3	load
L/H1	1									
L/H2	0.128647	1								
L/H3	0.166764	0.110081	1							
L/O1	0.779075	0.164562	0.263904	1						
L/O2	0.215114	0.710467	0.251333	0.283835	1					
L/O3	0.278052	0.159548	0.76923	0.438653	0.358709	1				
H/O1	-0.35681	0.008204	0.122027	0.186956	0.051056	0.162099	1			
H/O2	0.070057	-0.37794	0.107961	0.094491	0.26494	0.151405	0.004434	1		
H/O3	0.086514	0.050479	-0.28773	0.146907	0.104463	0.244615	0.027749	0.016613	1	
load	0.323772	0.199987	0.3899	0.615709	0.470311	0.725782	0.305096	0.253248	0.330944	1

جدول ۱۵- نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه سوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه انرژی گرمایشی

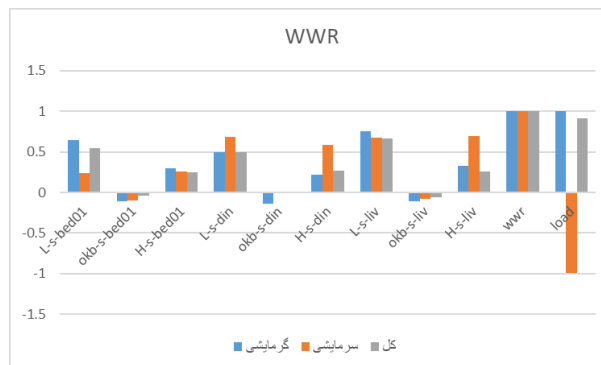
	(L*H)/O1	(L*H)/O2	(L*H)/O3	WWR/AVE- O	load
(L*H)/O1	1				
(L*H)/O2	0.226425	1			
(L*H)/O3	0.499847	0.342579	1		
WWR/AVE- O	0.745808	0.631379	0.866134	1	
load	0.757043	0.567815	0.848536	0.970124	1

مقایسه و جمع‌بندی نتایج همبستگی

وجود برخی اشتراکات در روابط همبستگی مصارف انرژی، نیازمند بررسی دقیق‌تر است تا رفتار روابط هر شاخص‌ها در هر سه حالت مصرف انرژی کل، سرمایشی و گرمایشی مشخص گردد. طبق اصول ماتریس همبستگی، ضریب هر شاخص با خودش برابر با عدد یک است لذا در نمودارهای مقایسه‌ای که در ادامه مطرح می‌شوند، این مورد جزو مقایسات قرار نمی‌گیرد. محور افقی نمودار، ردیفی از شاخص‌ها و خروجی انرژی است که وضعیت همبستگی شاخص‌های انتخابی با هر کدام توسط محور عمودی نمودار نشان داده می‌شود. هر چه فاصله از نقطه صفر محور عمودی چه در جهت مثبت و یا منفی بیشتر باشد، بیانگر شدت بیشتر رابطه است.

گروه اول: عرض پنجره در حالت مصرف انرژی گرمایشی شدت همبستگی بیشتری با شاخص‌ها داشته که بیشترین مقدار آن در عرض پنجره سایر فضاها و WWR است. این شاخص با OKB در انرژی گرمایشی، رابطه همبستگی خیلی ضعیف و منفی و با ارتفاع پنجره در سرمایش نیز به همین شدت اما در جهت مثبت را دارد. ارتفاع پنجره اما فقط در حالت مصرف انرژی سرمایشی دارای رابطه با هم‌نوع خود در فضاها دیگر است اما با شدت همبستگی ضعیف و مثبت؛ به غیر از آن نسبت به WWR نیز از همبستگی ضعیف تا قوی و مثبت را در هر سه حالت مصرف انرژی برخوردار است. OKB در همه مصارف انرژی همبستگی خیلی ضعیف را با همه شاخص‌ها دارد. شاخص WWR برای هر سه حالت مصرف انرژی با میزان ارتباط همبستگی خیلی قوی است و با عرض پنجره رابطه‌ای در حدود شدت متوسط را داراست.

جدول ۱۶- مقایسه نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه اول در بهینه‌یابی تک‌هدفه سه حالت مصرف انرژی

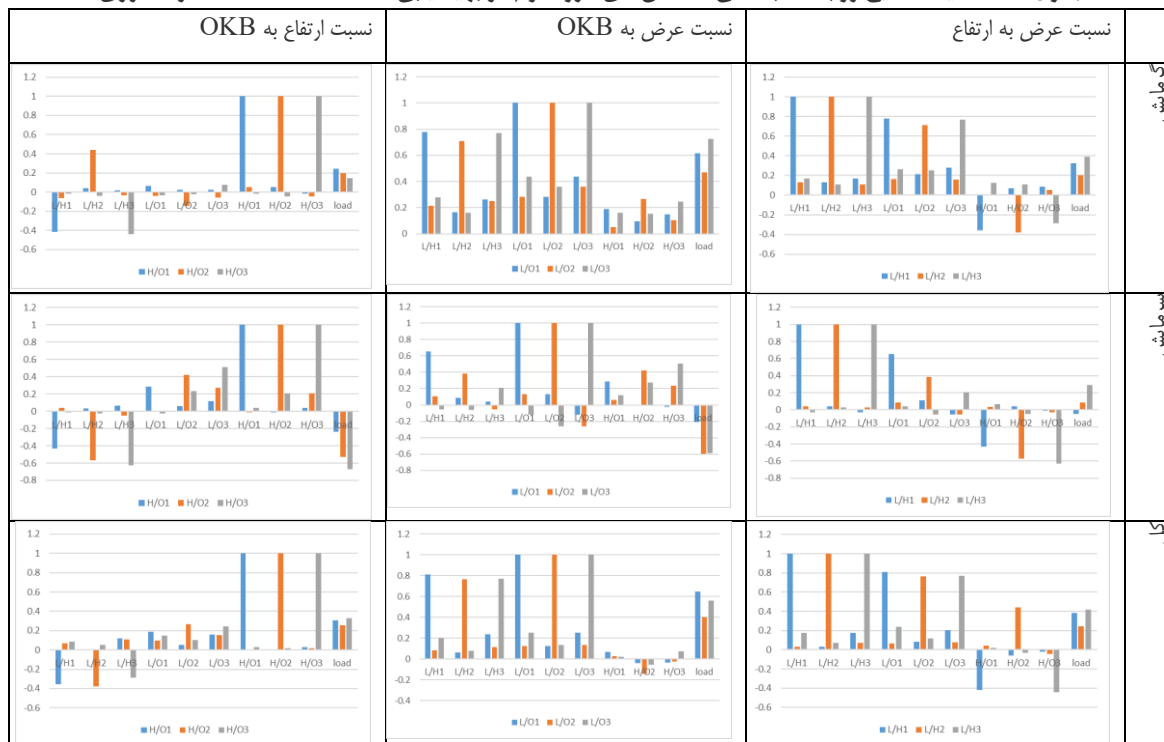


تصویر ۳- مقایسه نتایج روابط همبستگی شاخص WWR در بهینه‌یابی تک‌هدفه سه حالت مصرف انرژی

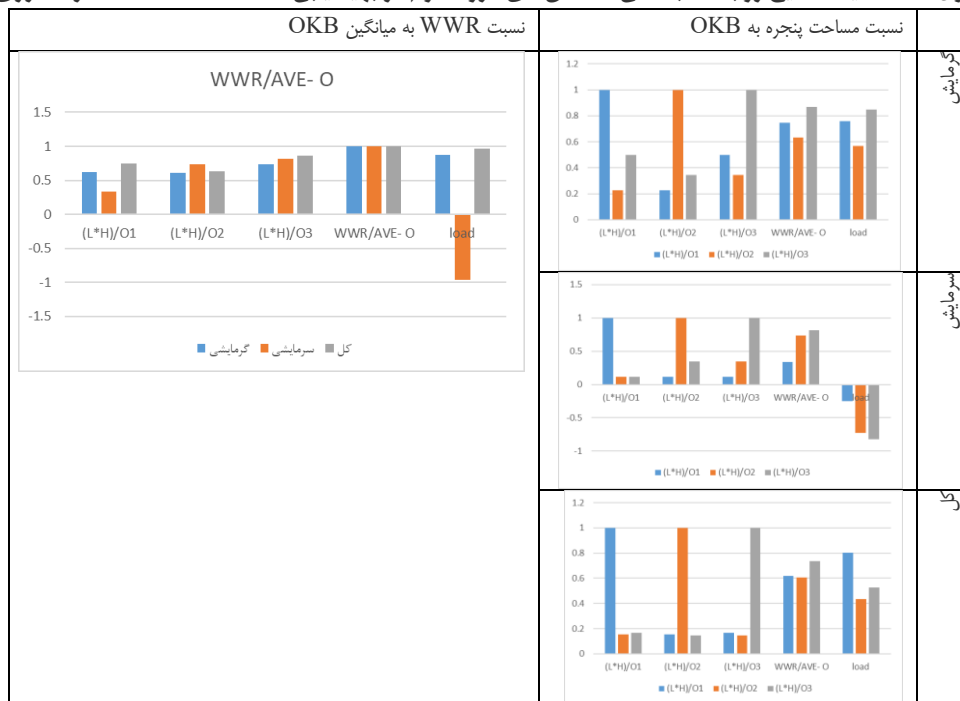
گروه دوم: محدوده مقادیر همبستگی نسبت عرض به ارتفاع با نسبت ارتفاع به OKB هر فضا با خودش در بازه ضعیف تا متوسط می‌باشد که نسبت به دو شاخص دیگر در مصارف انرژی دیگر، مخصوصاً در مصرف سرمایشی ارتباط بیشتری دارد. در نمودار نسبت عرض به OKB حالت مصرف انرژی گرمایشی، ارتباط این شاخص با همین نسبت در فضاهای دیگر از جمله بیشترین همبستگی‌های این نمودار است و کمترین آن با نسبت ارتفاع به OKB است و در سایر مصارف انرژی، این موارد با شدت کمتری هستند. این شاخص همچنین با شدت مصرف گرمایشی نیز همبستگی بالایی متوسط را دارد که در دو انرژی دیگر این مورد مقدار کمتری است. در نسبت ارتفاع به OKB بیشترین ارتباط آن هم به طور معکوس با مصرف انرژی سرمایشی است اما در هر سه نوع حالت مصرف انرژی، با نسبت عرض به ارتفاع در محدوده متوسط و بالاتر از آن شامل می‌شود.

گروه سوم: در گروه سوم زیرشاخص‌ها ارتباط نسبت مساحت پنجره به OKB با نسبت WWR به میانگین OKB و مصرف انرژی در هر سه حالت آن، نسبت به سایر شاخص‌ها همبستگی بیشتری دارد و بالاتر از متوسط را نشان می‌دهد اما شدت آن در مصرف گرمایشی بیشتر است و برای ارتباطات سایر شاخص‌ها نیز صادق است. بعد از ارتباط قوی نسبت WWR به میانگین OKB با مصرف انرژی در هر سه حالت آن، ارتباط با نسبت مساحت به OKB فضای پذیرایی مخصوصاً در مصرف انرژی گرمایشی بیشترین همبستگی قوی تا خیلی قوی را در خود دارد و در مرتبه دوم ارتباط آن همین شاخص برای فضای پذیرایی قرار می‌گیرد.

جدول ۱۷- مقایسه نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه دوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه سه حالت مصرف انرژی



جدول ۱۸- مقایسه نتایج روابط همبستگی شاخص‌های گروه سوم در بهینه‌یابی تک‌هدفه سه حالت مصرف انرژی



نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

در ادامه برای پاسخ به سوالات پژوهش، به دلیل همزمانی اجرای عمل همبستگی، نتایج یکجا بیان خواهد شد تا روند ذکر روابط، از هم گسسته نگردد؛ همچنین برای هر یک از مصارف انرژی کل، گرمایش و سرمایش و به ترتیب گروه‌های شاخص ذکر می‌شود تا دسته‌بندی کاربردی‌تری در زمینه‌های بیان شده نمایش داده شود. اینگونه است که تنوع حالات مستخرج و همگرایی‌هایشان، شرایط انتخاب مطلوب‌تری را برای طراح معمار میسر می‌سازد.

همگرایی‌ها در کل مصرف انرژی

در گروه اول، با شناسایی روابط همبستگی میان متغیرهای مستقل و وابسته داده‌های موجود، در مجموع نشان می‌دهد همبستگی WWR پنجره با شدت مصرف انرژی، اولویت اول بوده و بعد از آن عرض و ارتفاع پنجره است. رابطه همبستگی OKB با شدت مصرف انرژی یا بسیار مقدار کمی را دارد و یا نشان‌دهنده رابطه عکس این دو است. برای هر یک از فضاها انتخابی، دو شاخص عرض و ارتفاع پنجره دارای بیشترین همبستگی میان شاخص‌های دیگر در یک فضا هستند. در هر سه فضا، اولویت رابطه میان عرض پنجره و سایر شاخص‌های همان فضا به ترتیب اهمیت شامل WWR، ارتفاع و OKB است که این مورد برای همبستگی میان ارتفاع پنجره نیز به همین ترتیب می‌باشد با این تفاوت که بجای ارتفاع در اولویت‌بندی قبل، عرض قرار می‌گیرد. رابطه میان هر شاخص با نوع خود یا سایر شاخص‌ها در این سه فضا، در دو فضای پذیرایی و اتاق خواب بیشتر است تا نشیمن.

در گروه دوم، نسبت‌های عرض به OKB، نسبت‌های عرض به ارتفاع و نسبت‌های ارتفاع به OKB، در مجموع به ترتیب دارای اولویت بیشترین به کمترین همبستگی با مصرف انرژی می‌باشند. برای هر یک از فضاها، دو شاخص نسبت عرض به OKB و نسبت عرض به ارتفاع دارای بیشترین همبستگی میان شاخص‌های دیگر در یک فضا هستند. در هر سه فضا، اولویت رابطه همبستگی میان نسبت عرض به OKB و سایر شاخص‌های همان فضا به ترتیب اهمیت شامل نسبت عرض به ارتفاع و نسبت ارتفاع به OKB است که این مورد برای همبستگی میان نسبت عرض به ارتفاع با سایر شاخص‌ها نیز به همین ترتیب هست با این تفاوت که بجای اولویت اول، نسبت عرض به OKB قرار می‌گیرد. در این حالت نیز مانند گروه اول، رابطه شاخص‌ها در دو فضای پذیرایی و اتاق خواب دارای همبستگی بیشتری باهم هستند. در گروه سوم، اولویت‌بندی بیشترین تا کمترین همبستگی شاخص‌ها با مصرف انرژی شامل نسبت WWR به میانگین OKB، نسبت مساحت پنجره به OKB برای اتاق خواب، همین نسبت برای پذیرایی و در آخر برای نشیمن است. شاخص نسبت WWR به میانگین OKB با شاخص دیگر از کل فضاها، همبستگی بالاتری دارد اما شدت آن به ترتیب از پذیرایی، نشیمن و اتاق خواب کمتر می‌شود.

همگرایی‌ها در انرژی سرمایشی

در گروه اول، موارد همبستگی‌های شاخص میان متغیرهای مستقل و وابسته داده‌های موجود، بار دیگر نشان می‌دهد همبستگی WWR پنجره با شدت مصرف انرژی، در دو پنجره اتاق و نشیمن اولویت اول است. ارتفاع و عرض پنجره با اولویت دوم است که هر سه با مصرف انرژی رابطه عکس دارند. رابطه همبستگی OKB در این بخش هم با شدت مصرف انرژی، بسیار مقدار کمی را داراست. در اینجا نیز برای هر فضا، دو شاخص عرض و ارتفاع پنجره، بیشترین همبستگی را در یک فضا دارند و در هر سه فضا اولویت رابطه با عرض و ارتفاع پنجره به ترتیب حالت کل مصرف انرژی شامل WWR، ارتفاع/عرض و OKB می‌باشد. در دو فضای پذیرایی و نشیمن، رابطه میان هر شاخص با نوع خود یا سایر شاخص‌ها برقرار است.

در گروه دوم، نسبت‌های ارتفاع به OKB، نسبت‌های عرض به OKB و نسبت‌های عرض به ارتفاع، در مجموع به ترتیب دارای اولویت بیشترین به کمترین همبستگی با مصرف انرژی می‌باشند. برای هر کدام از فضاها، دو شاخص نسبت ارتفاع به OKB و نسبت عرض به OKB دارای بیشترین همبستگی میان شاخص‌های دیگر است. در هر یک از سه فضا، اولویت رابطه همبستگی میان نسبت ارتفاع به OKB و سایر شاخص‌های همان فضا به ترتیب اهمیت شامل نسبت ارتفاع به OKB و نسبت عرض به ارتفاع است که این مورد برای همبستگی میان نسبت ارتفاع به OKB با سایر شاخص‌ها نیز به همین ترتیب هست. در این حالت نیز مانند گروه اول، رابطه شاخص‌ها در دو فضای پذیرایی و نشیمن دارای همبستگی بیشتری باهم هستند.

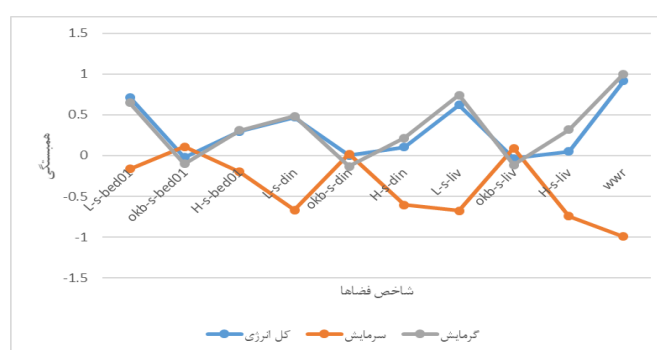
در گروه سوم، اولویت‌بندی بیشترین تا کمترین همبستگی شاخص‌ها با مصرف انرژی سرمایشی شامل نسبت WWR به میانگین OKB، نسبت مساحت پنجره به OKB و به شکل معکوس این شاخص‌هاست. مانند کل مصرف انرژی، ترتیب شدت همبستگی در شاخص نسبت WWR به میانگین OKB با شاخص دیگر از کل فضاها، به ترتیب از پذیرایی، نشیمن و اتاق خواب کمتر می‌شود.

همگرایی‌ها در انرژی گرمایشی

در گروه اول، موارد همبستگی‌های میان متغیرهای مستقل و وابسته داده‌های موجود، بیان می‌کند که همبستگی WWR با شدت مصرف انرژی، اولویت اول بوده و بعد از آن ارتفاع و عرض پنجره است اما مانند سرمایش به مصرف انرژی رابطه عکس ندارند. مجدداً رابطه همبستگی OKB در این بخش هم با شدت مصرف انرژی بیانگر مقدار کم و به طور معکوس است. چون ارتفاع و عرض پنجره در محاسبه WWR دخیل هستند لذا در روابط همبستگی، نزدیکی زیادی با یکدیگر دارند. اینبار نیز برای هر فضا، شاخص عرض، بیشترین همبستگی را بین شاخص‌های دیگر دارند اما در مجموع روابط شاخص‌ها به جز WWR در هر سه فضا نسبت به یکدیگر همبستگی ضعیفی دارد.

در گروه دوم نیز مانند نتایج کل مصرف انرژی، برای مصرف انرژی گرمایشی نسبت‌های عرض به OKB، نسبت‌های عرض به ارتفاع و نسبت‌های ارتفاع به OKB، به ترتیب دارای اولویت همبستگی بیشتر به کمتر هستند. برای هر یک از فضاها، دو شاخص نسبت عرض به OKB و نسبت عرض به ارتفاع با بیشترین همبستگی بین بقیه شاخص در یک فضا قرار دارند اما مقدار این همبستگی‌ها برای فضای نشیمن به نسبت دو فضای دیگر، کمتر است. هر شاخص یک نیز با دو شاخص مربوط به همان فضا همبستگی زیاد دارد و با فضاها دیگر این ارتباط ضعیف است.

در گروه سوم، اولویت‌بندی همبستگی شاخص‌ها با مصرف انرژی گرمایشی شامل نسبت WWR به میانگین OKB، نسبت مساحت پنجره به OKB برای اتاق خواب، همین نسبت برای پذیرایی و در آخر برای نشیمن است. شاخص WWR مانند مراحل قبل بیشترین ارتباط همبستگی مثبت را با شاخص دیگر دارد؛ اما این ارتباط طبق هر فضا متغیر است که بیشترین آن با پذیرایی و کمترین آن با نشیمن می‌باشد. تا کنون اشکال مختلف ارتباط همبستگی میان شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفت اما نمایش تفاوت‌ها و اشتراک سه حالت مصرف انرژی، حاکی از ارتباط نزدیک به هم دو گونه مصرف انرژی گرمایشی و انرژی کل با یکدیگر بوده و مصرف سرمایشی به طور قابل ملاحظه‌ای در حدود معکوس آن دو است. این موارد برای هر فضا و در گروه اول شاخص‌ها که موارد اصلی شاخص‌ها می‌باشند، صدق می‌کند.



تصویر ۴- مقایسه روابط همبستگی شاخص‌ها در فضاها در سه حالت مصرف انرژی کل، گرمایش و سرمایش

منابع

- آذرنیو، نازنین؛ پورطاهری، مهدی؛ و رکن الدین افتخاری، عبدالرضا. (۱۴۰۲). تحلیل عوامل موثر بر پایداری مسکن روستایی (مورد مطالعه: دهستان بلیان شهرستان کازرون). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۳(۲)، ۱۱۵-۱۳۱. <https://doi.org/10.22126/ges.2023.8407.2589>
- اخترکاوان، مهدی؛ و شفیی، سمانه. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر ابعاد پنجره بر نورگیری طبیعی و مصرف انرژی در مجموعه‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک ایران، مورد مطالعاتی: شهر اصفهان. *معماری و شهرسازی آرمان شهر*، ۴۲، ۱۷-۳۰. <https://doi.org/10.22034/aaud.2021.174175.1822>
- اکبری، حامد. (۱۳۹۹). طراحی برج مسکونی در بابلسر در راستای کاهش مصرف انرژی با فرم یابی ساختمان‌های بلند (با استفاده از نرم افزار تحلیل انرژی) (پایان نامه کارشناسی ارشد). موسسه آموزش عالی آمل.
- اولادی، مریم؛ ترکاشوند، عباس؛ و فیضی، محسن. (۱۴۰۱). بررسی همبستگی میان اندازه‌ی بناها در بلوک‌های شهری و بار سرمایشی و گرمایشی سالانه. *دانش شهرسازی*، ۶(۱)، ۷۱-۹۱. <https://doi.org/10.22124/upk.2022.21344.1712>
- پورموسی، محبوبه؛ مفیدی شمیرانی، سید مجید؛ و محمودی زندی، مهناز. (۱۳۹۹). بررسی اصول کالبدی بازشوها و تأثیر آن بر میزان جریان هوا در بناهای مسکونی اقلیم معتدل و مرطوب ایران (مطالعه موردی خانه کلبادی ساری و خانه شفاهی آمل). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۹۹، ۳۴۹-۳۶۲. <https://doi.org/10.22034/jest.2021.30727.3918362>
- حدادزادگان، هانی؛ زمردیان، زهراسادات؛ و تحصیلدوست، محمد. (۱۳۹۹). ارزیابی حساسیت متغیرهای معماری ساختمان‌های بلندمرتبه در عملکرد حرارتی و مصرف انرژی در اقلیم‌های گوناگون. *معماری اقلیم گرم و خشک*، ۱(۱۲)، ۲۴۴-۲۶۲. <https://doi.org/10.29252/ahdc.2021.14249.1370>
- خاکپور، مژگان. (۱۳۸۴). مسکن بومی در جوامع روستایی گیلان. *نشریه هنرهای زیبا*، ۲۲(۲۲)، ۶۳-۷۲. https://jhz.ut.ac.ir/article_10739.html
- خراباتی، ساجده؛ و نیک‌مرد، آوا. (۱۴۰۱). بررسی مؤلفه‌های مؤثر بر پایداری معماری روستایی (مورد مطالعه: روستای ارمیان میامی). *پژوهش‌های روستایی*، ۵۱، ۵۰۴-۵۲۵. <https://doi.org/10.22059/jrur.2022.338677.1720>

- رزمی، حمیدرضا؛ غلامی، میلاد؛ و حسینی نژاد، لادن. (۱۴۰۳). جستاری بر شناخت ویژگی‌های ساختاری معماری مسکن روستایی شهرستان گرگان (مطالعه موردی: روستای شاهکوه سفلی). *پژوهش‌های نوین علوم جغرافیایی، معماری و شهرسازی*، ۵(۴۶)، ۸۱-۱۱۲.
- رهسپار منفرد، رضا؛ و عظمتی، سعید. (۱۴۰۰). تحلیل رفتار باد در تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی در بنای مسکونی مبتنی بر معماری بومی، مورد مطالعاتی: تأثیر ابعاد و جانمایی بازشو بر تهویه طبیعی در شهر آمل. *معماری و شهرسازی آرمان شهر*، ۲۵، ۱۰۳-۱۱۴. <https://doi.org/10.22034/aaud.2020.210648.2058>
- زندیه، مهدی؛ و حصاری، پدرام. (۱۳۹۱). تداوم معماری مسکن روستایی با انگیزه توسعه پایدار روستایی. *مسکن و محیط روستا*، ۱۳۸، ۶۳-۷۲. <https://jhre.ir/article-1-166-fa.html>
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان گیلان. (۱۴۰۰). *سالنامه آماری استان گیلان*.
- سرتیپی پور، محسن. (۱۳۸۴). شاخص‌های معماری مسکن روستایی در ایران. *هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی*، دوره دهم - شماره ۲، ۴۳-۵۲. https://jhz.ut.ac.ir/article_10737.html
- سنایی مقدم، سروش؛ و محمدی یگانه، بهروز. (۱۳۹۶). تحلیل عوامل موثر در پایداری مسکن روستایی: مطالعه موردی سکونتگاه‌های روستایی بخش چاروسا، شهرستان کهگیلویه و بویراحیه. *اندیشه جغرافیا*، ۱۶، ۱۱۹-۱۴۴. https://geonot.znu.ac.ir/article_25846.html
- طاهباز، منصوره؛ و جلیلیان، شهربانو. (۱۳۹۰). شاخصه‌های همسازی با اقلیم در مسکن روستایی استان گیلان. *مجله مسکن و محیط روستا*، ۱۳۵. <http://jhre.ir/article-1-202-fa.html>
- فلاح، حسین. (۱۳۹۸). تعیین نسبت پهنه پنجره به دیوار در جبهه جنوبی ساختمان‌های آموزشی در کرمان. *نشریه نقش جهان*، ۳۴، ۱۰۵-۱۱۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1398.9.2.3.4>
- کسمائی، مرتضی. (۱۳۷۲). پهنه‌بندی اقلیمی ایران. *تازه‌های ساختمان و مسکن*، ۱۵۱.
- کسمائی، مرتضی. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی و راهنمای طراحی اقلیمی معتدل و مرطوب (استان‌های گیلان و مازندران). تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- گرچی مهبلبانی، یوسف؛ و یاران، علی. (۱۳۸۹). راهکارهای معماری پایدار گیلان به همراه قیاس با معماری ژاپن. *هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی*، ۱۵(۴۱)، ۴۳-۵۴. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286020.1389.2.41.4.1>
- لنگ، جان. (۱۴۰۲). *آفرینش نظریه معماری: نقش علوم رفتاری در طراحی محیط* (چاپ دوازدهم؛ ترجمه ع. ر. عینی‌فر). تهران: موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران.
- نجفی، ندا؛ و علی الحسائی، مهران. (۱۴۰۱). بازخوانی مفهوم زمینه در راستای معاصر سازی معماری روستایی (نمونه مطالعاتی: روستای بلیران در مازندران). *پژوهش‌های جغرافیایی اقتصادی*، ۳(۷)، ۲۰-۴۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27173747.1401.3.7.2.7>
- نوریان، علی‌رضا؛ و زهری، سارا. (۱۴۰۲). راهکارهای کاهش مصرف انرژی و طراحی همساز با اقلیم در شهر همدان با الگوگیری از معماری خانه‌های سنتی دوره قاجار. *فصلنامه معماری و محیط پایدار*، ۱(۴)، ۷۷-۹۲. <https://sanad.iau.ir/Journal/jsac/Article/1103515>
- مفیدی، محمدرضا؛ و مفیدی، سحر. (۱۴۰۰). روش تحقیق تخصصی در معماری و انرژی (چاپ اول). تهران: کیان دانش.
- میرمیران، سیده مهدیه؛ ملک افضلی، علی‌اصغر؛ و کریمی فرد، لیلا. (۱۳۹۹). الگویابی میانوار در خانه‌های تاریخی گیلان. *مسکن و محیط روستا*، ۱۳۹(۱۷۱)، ۱۱۷-۱۲۸. <https://doi.org/10.22034/39.171.117>
- میری، بهاره؛ عزمی، آئیش؛ و اکبرپور، محمد. (۱۳۹۹). تحلیل ساختاری و کارکردی پایداری مسکن روستایی (مورد مطالعه: دهستان سرفیروزآباد، بخش مرکزی کرمانشاه). *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، ۲۰، ۵۳-۷۳. <https://doi.org/10.30473/psp.2021.51392.2257>
- Abdellatif, M., & Al-Shamma'a, A. (2015). Review of sustainability in buildings. *Sustainable Cities and Society*, 14, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.09.002>
- Ashnavar, M., & Bina, M. (2022). The effect of window shape on the amount of radiation received and cooling load in a residential building in Ahvaz, Iran. *International Journal of Ambient Energy*, 43, 7548-7559. <https://doi.org/10.1080/01430750.2022.2059781>
- Ayyad, T. M. (2011). *The impact of building orientation, opening to wall ratio, aspect ratio and envelope materials on buildings energy consumption in the tropics* (Doctoral dissertation, The British University in Dubai).
- Bagheri, S., Moradinasab, H., & Yeganeh, M. (2024). The effect of window proportions in low-rise residential buildings on annual energy consumption in humid temperate climate: Case study of Rasht city in Iran. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1463678. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1463678>
- Bera, M., & Nag, P. K. (2022). Bioclimatic design of low-cost rural dwellings. *Frontiers in Built Environment*, 8, 773108. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.773108>
- Boitor, R. M., Antov, D., & Iliescu, M. (2013). Sustainable urban transport planning. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*, 2(1). <https://doi.org/10.1515/rjt-2015-0010>
- Cattaneo, T., Giorgi, E., Ni, M., & Manzoni, G. D. (2016). Sustainable development of rural areas in the EU and China: A common strategy for architectural design, research practice and decision-making. *Buildings*, 6(4), 42. <https://doi.org/10.3390/buildings6040042>

- Chaturvedi, S. (2008). Energy efficiency and sustainability in buildings. In *AEI 2008: Building Integration Solutions* (pp. 1–8).
- Chiesa, G., Acquaviva, A., Grosso, M., Bottaccioli, L., Florida, M., Pristeri, E., & Sanna, E. M. (2019). Parametric optimization of window-to-wall ratio for passive buildings adopting a scripting methodology to dynamic-energy simulation. *Sustainability*, 11, 3078. <https://doi.org/10.3390/su11113078>
- Dagiyan, M. M., Molaei, M., Fallah, R., & Sangin, H. (2024). Enhancing energy efficiency in a hypothetical building through analysis of orientation, WWR, shading, window shape, and illuminance intensity. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4904853/v1>
- Farivar, S., & Teimourtash, S. (2023). Impact of window design on dynamic daylight performance in an office building in Iran. *Journal of Daylighting*, 10(1), 31–44. <https://doi.org/10.15627/jd.2023.10.1.31>
- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43, 1030–1037. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>
- Heydari, A., Sadati, S. E., & Gharib, M. R. (2021). Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 35, 102099. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102099>
- Inanici, M. N., & Demirbilek, F. N. (2000). Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. *Building and Environment*, 35, 41–52. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00002-5)
- Jiang, W., Liu, B., Li, Q., Li, D., & Ma, L. (2021). Weight of energy consumption parameters of rural residences in severe cold area. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101131. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101131>
- Kheiri, F., & Arch, M. (2013). The relation of orientation and dimensional specifications of window with building energy consumption in four different climates of Koppen classification. *Researcher*, 12, 107–115. <https://doi.org/10.7480/abe.2018.19.2528>
- Kim, J. J., & Rigdon, B. (1998). *Introduction to sustainable design* (Doctoral dissertation, National Pollution Prevention Center for Higher Education).
- Koohsari, A. M., Fayaz, R., & Kari, B. M. (2015). The influence of window dimensions and location on residential building energy consumption by integrating thermal and lighting analysis in a mild and humid climate. *BRIS Journal of Advances in Science and Technology*, 3, 187–194.
- Li, W., Meng, X., & Huang, Y. (2021). Fitness distance correlation and mixed search strategy for differential evolution. *Neurocomputing*, 458, 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.12.141>
- Liu, K., Xu, X., Zhang, R., Kong, L., Wang, W., & Deng, W. (2023). Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China. *Energy and Buildings*, 280, 112727. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112727>
- Lu, S., Tang, X., Ji, L., & Tu, D. (2017). Research on energy-saving optimization for the performance parameters of rural-building shape and envelope by TRNSYS-GenOpt in hot summer and cold winter zone of China. *Sustainability*, 9, 294. <https://doi.org/10.3390/su9020294>
- Maleki, A., & Dehghan, N. (2020). Optimization of energy consumption and daylight performance in residential building regarding window design in hot and dry climate of Isfahan. *Science and Technology for the Built Environment*, 27, 351–366. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1812294>
- Marino, C., Nucara, A., & Pietrafesa, M. (2017). Does window-to-wall ratio have a significant effect on the energy consumption of buildings? A parametric analysis in Italian climate conditions. *Journal of Building Engineering*, 13, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.08.001>
- Mokhtari, R., Dehghan, N., & Maleki, A. (2023). Analysis of the impact of window properties on the main living space with the aim of daylight efficiency and energy saving in the hot and dry climate of Isfahan. *Journal of Solar Energy Research*, 8, 1235–1249. <https://doi.org/10.22059/jser.2022.349312.1258>
- Peng, L., Wu, H., Wei, W., Ma, J., & Li, S. (2019, December). Analysis of rural housing design optimization based on value engineering. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 358, No. 4, p. 042036). IOP Publishing.
- Pirzad, A., & Riahi Moghaddam, S. (2019). A survey for relationship between ecological rural architecture and rural economy in moderate-humid regions and hot-dry areas. *Art and Technique*, 1(1), 41–59.
- Pourtaheri, M., & Hemmati, S. (2017). Comparative assessment of the sustainability of rural housing in the old and new textures of rural areas: A case study in villages of central area of Kabudarahang County. *Journal of Sustainable Rural Development*, 1(1), 69–82. <https://doi.org/10.18869/nrip.jsrd.1.1.67>
- Rafsanjani, H. N., Ahn, C. R., & Alahmad, M. (2015). A review of approaches for sensing, understanding, and improving occupancy-related energy-use behaviors in commercial buildings. *Energies*, 10, 10996–11029. <https://doi.org/10.3390/en81010996>

- Saber, A. (2021). Effects of window-to-wall ratio on energy consumption: Application of numerical and ANN approaches. *Soft Computing in Civil Engineering*, 5, 41–56. <https://doi.org/10.22115/SCCE.2021.281977.1299>
- Sadeghi, Z., Azizpour, F., Tahmasebi, A., & Sartipour, M. (2022). A conceptual framework for sustainable rural housing development, based on the theoretical orientation of scientific articles. *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 4, 1–22. https://www.srds.ir/article_146341.html?lang=en
- Shao, N., Zhang, J., & Ma, L. (2017). Analysis on indoor thermal environment and optimization on design parameters of rural residence. *Journal of Building Engineering*, 12, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.05.003>
- Shao, T., Zheng, W., & Cheng, Z. (2021). Passive energy-saving optimal design for rural residences of Hanzhong region in northwest China based on performance simulation and optimization algorithm. *Buildings*, 11, 421. <https://doi.org/10.3390/buildings11090421>
- Soudbaksh, K., Etmnan, M., Hakimazari, M., & Salavatian, S. (2022). Impacts of window factors and building orientation on energy consumption in residential buildings of humid temperate climatic zone in Iran. *Journal of Construction in Developing Countries*, 27, 235–262. <https://doi.org/10.21315/jcdc-04-21-0061>
- Susorova, I., Tabibzadeh, M., Rahman, A., Clack, H. L., & Elnimeiri, M. (2013). The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings. *Energy and Buildings*, 57, 6–13. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.035>
- Tawfeeq, H., & Qaradaghi, A. M. A. (2024). Optimising window-to-wall ratio for enhanced energy efficiency and building intelligence in hot summer Mediterranean climates. *Sustainability*, 16(17), 7342. <https://doi.org/10.3390/su16177342>
- Troup, L., Phillips, R., Eckelman, M. J., & Fannon, D. (2019). Effect of window-to-wall ratio on measured energy consumption in US office buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109434. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109434>
- Vanhoutteghem, L., Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy and Buildings*, 102, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.018>
- Vettorato, D. (2011). Bridging urban morphology and energy performance analysis. In *47th ISOCARP Congress* (pp. 1–12).
- Wu, C., Pan, H., Luo, Z., Liu, C., & Huang, H. (2024). Multi-objective optimization of residential building energy consumption, daylighting, and thermal comfort based on BO-XGBoost-NSGA-II. *Building and Environment*, 254, 111386. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111386>
- Zhang, Y., Omer, S., & Hu, R. (2025). Impact of window size modification on energy consumption in UK residential buildings: A feasibility and simulation study. *Sustainability*, 17(7), 3258. <https://doi.org/10.3390/su17073258>
- Zhou, J., & Hua, Z. (2022). A correlation guided genetic algorithm and its application to feature selection. *Applied Soft Computing*, 123, 108964. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108964>