فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد
دوره ۱، شماره ۲، بهار ۱۴۰۵
شاپا الکترونیکی: ۰۸۲۲-۳۱۳۴
https://ccae.ubonab.ac.ir



Research Paper

Evaluating the impact of biophilic architecture on optimizing energy consumption and thermal comfort in historical houses in cold climates (Case study: Kabiri and Yousefi Khoy House)

AmirHossein Zeynali: Graduated from Architectural Engineering, Islamic Azad University, Khoy Branch, Khoy, Iran.
Masoud Mohammadzadeh*: Department of Architecture, Khoy.C., Islamic Azad University, Khoy, Iran
Pantea Khezerlou: Master of Architecture and Energy,Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran
Fatemeh Nori: Master of Agricultural Engineering, Khoy Azad University, Khoy, Iran.

ARTICLEINFO

Received:2026/01/21
Accepted:2026/05/09
PP: 32-57

Scan the QR code below to access and read this article.

Keywords: Biophilic Architecture; Historical Houses; Cold Climate; Energy Optimization; Thermal Comfort.

Abstract

Historical fabrics in Iran, particularly in the city of Khoy, face the simultaneous challenge of preserving physical authenticity while reducing energy consumption. The cold climate, weak thermal envelopes, high air infiltration, and restrictions on intervention increase dependence on fossil-fuel heating and, together with the limited presence of natural elements, reduce thermal comfort. Biophilic architecture can improve environmental performance through the purposeful integration of natural elements; however, its effectiveness in cold-climate historic buildings has rarely been quantitatively evaluated. This study was conducted using a mixed-methods approach as a scenario-based simulation study. The aim was to comparatively evaluate intervention alternatives and provide a decision-making framework rather than to accurately predict actual energy consumption. The research included physical and technical analysis of buildings, energy simulation under five scenarios, user assessment through questionnaires, and scenario ranking using the Analytic Network Process (ANP). The questionnaire reliability was acceptable, with a Cronbach's alpha of 0.876. In Kabiri House, the S4 scenario reduced annual heating load from 102/5 to 82/0 kWh/m²·year, cooling load from 10/0 to 5/5 kWh/m²·year, and final energy consumption from 120.0 to 95.0 kWh/m²·year, while increasing thermal comfort hours from 67/5% to 82/5%. In Yousefi House, heating load decreased from 140/0 to 118.0 kWh/m²·year, cooling load from 15/0 to 10/0 kWh/m²·year, and final energy consumption from 160.0 to 136/0 kWh/m²·year, while comfort hours increased from 60/0% to 75/0%. The findings indicate that low-intervention biophilic strategies, when compatible with conservation constraints, can provide a practical basis for improving energy performance, enhancing thermal comfort, and supporting decision-making in cold-climate historic houses.

Citation:. Zeinali. A.m., Mohammadzadeh. M., Khazerloo. P., Nouri. F. (2026). Evaluating the impact of biophilic architecture on optimizing energy consumption and thermal comfort in historical houses in cold climates (Case study: Kabiri and Yousefi Khoy House). *Journal of Cold Climate Architecture and Environment*,Vol 13, No 51, PP: 1-18.
DOI:

فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد
دوره ۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵
شاپا الکترونیکی: ۰۸۲۲-۳۱۳۴
https://ccae.ubonab.ac.ir



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Dense historic urban fabrics in cold-climate regions face a complex challenge: they must preserve architectural authenticity while responding to contemporary demands for energy efficiency and thermal comfort. This issue is particularly significant in the historic fabric of Khoy, located in northwestern Iran, where cold and semi-arid climatic conditions, long heating periods, weak thermal envelopes, single-glazed openings, and high air infiltration increase dependence on fossil-fuel-based heating systems. At the same time, the compact morphology of the historic fabric and the limited presence of natural elements reduce environmental quality, visual connection with nature, and users' thermal comfort.

The main problem addressed in this study is the lack of low-intervention and heritage-compatible strategies for reducing energy consumption in historic buildings located in cold climates. Conventional energy retrofitting measures often require intrusive physical changes that may conflict with conservation principles. Therefore, there is a need for context-sensitive approaches that can improve energy performance while maintaining the spatial, cultural, and material authenticity of historic buildings.

Biophilic architecture provides a potential response to this problem by integrating natural elements into the built environment. Elements such as vegetated courtyards, green walls, and green roofs can contribute to thermal moderation through shading, additional insulation, surface temperature reduction, and microclimatic improvement. Beyond their technical role, these elements may also enhance users' sensory and psychological connection with nature, which distinguishes the biophilic approach from purely technical sustainability strategies. Although previous studies have examined the effect of green roofs, green walls, and vegetation on building energy performance, most have focused on new buildings, warm climates, or individual green components. Limited quantitative evidence exists regarding the integrated application of biophilic strategies in cold-climate historic buildings under heritage constraints. Accordingly, this study investigates the impact of localized biophilic interventions on energy performance and thermal comfort in two historic houses in Khoy: Kabiri House and Yousefi House.

Methodology

This research adopts a mixed-methods approach with a pragmatic orientation. The study combines physical and climatic analysis, dynamic energy simulation, questionnaire-based assessment, and multi-criteria decision-making. The research process consists of three main stages.

First, the historic fabric of Khoy and the two selected case-study buildings were analyzed in terms of spatial organization, construction materials, envelope characteristics, courtyard-based morphology, and climatic behavior. Kabiri and Yousefi houses, both belonging to the Qajar period, were selected because they represent the dominant type of historic courtyard houses in Khoy. Their thick masonry walls, earthen roof systems, timber elements, single-glazed wooden windows, and introverted spatial organization reflect the architectural response of the region to cold and semi-arid climatic conditions.

Second, three-dimensional models of the two buildings were prepared and simulated using DesignBuilder with EnergyPlus as the simulation engine. The baseline scenario represented the existing condition of each building. Four intervention scenarios were then defined:

- S0: Existing condition without intervention.
- S1: Vegetated courtyard using native plant species and permeable surfaces.
- S2: Interior green wall on the courtyard-facing façade
- S3: lightweight/extensive green roof with cold-resistant plant species
- S4: Combined scenario integrating S1, S2, and S3

The main performance indicators included annual heating load, annual cooling load, total final energy use, peak heating and cooling capacity, percentage of annual comfort hours, and average operative temperature during peak winter and summer periods.

Third, the perceptual and qualitative dimensions of the biophilic interventions were evaluated using a five-point Likert-scale questionnaire. The questionnaire assessed users' perceptions of biophilic qualities, spatial quality, environmental-thermal quality, and acceptance of the proposed design interventions. Its internal consistency was examined using Cronbach's alpha, and the integrated scale showed acceptable reliability ($\alpha = 0/876$). In addition, the Analytic Network Process (ANP) was employed to rank the intervention scenarios based on expert pairwise

judgments, considering energy performance, heritage compatibility, implementation feasibility, cost, risk, and spatial quality.

Results and Discussion

The simulation results indicate that the combined biophilic scenario, S4, produced the highest improvement in both case-study buildings.

In Kabiri House, the annual heating load decreased from 102/5 to 82/0 kWh/m²·year, while the annual cooling load decreased from 10/0 to 5/5 kWh/m²·year. Total final energy use was reduced from 120/0 to 95/0 kWh/m²·year. In addition, comfort hours increased from 67.5% to 82.5%. The average indoor operative temperature in January increased from approximately 17/5°C to 20/0°C, while the average indoor operative temperature in August decreased from about 28/2°C to 26/0°C.

In Yousefi House, which had a weaker baseline thermal envelope, the annual heating load decreased from 140 to 118/0 kWh/m²·year, and the annual cooling load decreased from 15/0 to 10/0 kWh/m²·year. Total final energy use declined from 160/0 to 136/0 kWh/m²·year, while comfort hours increased from 60/0% to 75/0%. The average indoor temperature in January increased from approximately 16/5°C to 18/5°C, and the average August temperature decreased from about 29/0°C to 27/5°C.

These findings suggest that the combination of courtyard vegetation, green walls, and green roofs can reduce both heating and cooling demands by improving shading, increasing thermal resistance, moderating surface temperatures, and improving the local microclimate. However, the cooling-load reduction should be interpreted carefully. Since Khoy has a cold climate and the absolute cooling load is relatively low, even a small numerical reduction in cooling demand may appear as a large percentage reduction. For example, in Kabiri House, the cooling load decreased from 10/0 to 5/5 kWh/m²·year, which represents a substantial percentage change but a limited absolute cooling-energy value.

The results also indicate that the green roof had the most significant effect on reducing roof-related heat loss, while the green wall and vegetated courtyard contributed to reducing wall and window-related heat gains and losses. In both buildings, the combined scenario performed better than individual interventions, showing that the synergy between different biophilic elements is more effective than applying each measure separately.

The questionnaire and multi-criteria evaluation supported the simulation findings. The combined scenario, S4, achieved the highest overall ranking due to its strong energy performance and positive effect on spatial quality. Nevertheless, in buildings with higher conservation sensitivity or structural limitations, lighter interventions such as S1, the vegetated courtyard, may be more appropriate because they involve lower implementation risk and less physical alteration to the historic fabric.

Conclusion

This study demonstrates that context-sensitive biophilic interventions can contribute to reducing energy consumption and improving thermal comfort in cold-climate historic buildings without requiring destructive intervention in the original fabric. The combined scenario, including a vegetated courtyard, green wall, and green roof, achieved the best overall performance in both Kabiri and Yousefi houses.

In Kabiri House, the combined scenario reduced total final energy use from 120/0 to 95/0 kWh/m²·year and increased comfort hours from 67/5% to 82/5%. In Yousefi House, total final energy use decreased from 160.0 to 136/0 kWh/m²·year, and comfort hours increased from 60.0% to 75.0%. These results confirm that localized biophilic strategies can act as both environmental and experiential tools in the sustainable regeneration of historic urban fabrics.

The theoretical contribution of this research lies in linking biophilic design, cold-climate energy performance, cultural compatibility, and heritage conservation within a single analytical framework. Practically, the findings indicate that the combined scenario (S4) provides the best overall performance in both case-study houses; however, vegetated courtyards (S1) can be considered as a lower-risk and more heritage-compatible alternative in buildings with stricter conservation constraints. Green walls and green roofs should therefore be implemented only after careful technical assessment of moisture control, structural capacity, maintenance requirements, and conservation requirements.

Overall, the study argues that biophilic architecture should not be understood merely as the addition of greenery to historic buildings. Rather, when adapted to local climate, traditional spatial patterns, and conservation requirements, it can become an effective strategy for reducing energy demand, improving thermal comfort, and enhancing the livability of dense historic fabrics in cold regions.

فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد
دوره ۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵
شاپا الکترونیکی: ۰۸۲۲-۳۱۳۴
https://ccae.ubonab.ac.ir
وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه بناب



مقاله پژوهشی

ارزیابی تأثیر معماری بیوفیلیک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد (مطالعه موردی: خانه کبیری و یوسفی خوی)

زینالی، امیرحسین[۱]؛ محمدزاده، مسعود*[۲]؛ خضرلو، پانته‌آ[۳]؛ نوری، فاطمه[۴]

[۱] دانش آموخته مهندسی معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خوی، خوی، ایران.
[۲] گروه معماری، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران.
[۳] کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
[۴] کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی، آموزش و پرورش خوی، ایران.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹
شماره صفحات: ۵۷-۳۲

برای مطالعه این مقاله کد زیر را اسکن کنید

واژه‌های کلیدی:
معماری بیوفیلیک؛ خانه‌های تاریخی؛ اقلیم سرد؛ بهینه‌سازی مصرف انرژی؛ آسایش حرارتی

چکیده

بافت‌های تاریخی ایران، به‌ویژه شهر خوی، با چالش هم‌زمان حفظ اصالت کالبدی و کاهش مصرف انرژی روبه‌رو هستند. اقلیم سرد، ضعف پوسته حرارتی، نفوذپذیری بالای هوا و محدودیت مداخله، وابستگی به گرمایش فسیلی را افزایش داده و همراه با کمبود عناصر طبیعی، آسایش حرارتی را کاهش داده است. معماری بیوفیلیک با ادغام هدفمند عناصر طبیعی می‌تواند عملکرد محیطی را بهبود بخشد، اما کارایی آن در بناهای تاریخی سردسیر کمتر به‌صورت کمی ارزیابی شده است. این پژوهش با رویکرد ترکیبی و به‌صورت مطالعه‌ای سناریویی مبتنی بر شبیه‌سازی انجام شد و هدف آن مقایسه نسبی گزینه‌های مداخله و ارائه چارچوب تصمیم‌گیری است، نه پیش‌بینی دقیق مصرف واقعی انرژی. پژوهش شامل تحلیل کالبدی و فنی بناها، شبیه‌سازی انرژی در پنج سناریو، ارزیابی کاربران با پرسش‌نامه و رتبه‌بندی سناریوها با روش ANP بود. پایایی پرسش‌نامه با آلفای کرونباخ ۰/۸۷۶ قابل‌قبول بود. در خانه کبیری، سناریوی S4 بار گرمایش سالانه را از ۱۰۲/۵ به ۸۲/۰، بار سرمایش را از ۱۰/۰ به ۵/۵ و مصرف نهایی انرژی را از ۱۲۰/۰ به ۹۵/۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش داد و ساعات آسایش را از ۵/۶۷ به ۵/۸۲ درصد رساند. در خانه یوسفی نیز بار گرمایش از ۱۴۰/۰ به ۱۱۸/۰، بار سرمایش از ۱۵/۰ به ۱۰/۰ و مصرف نهایی انرژی از ۱۶۰/۰ به ۱۳۶/۰ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش یافت و ساعات آسایش از ۶۰/۰ به ۷۵/۰ درصد رسید. یافته‌ها نشان می‌دهد مداخلات بیوفیلیک کم‌مداخله، در صورت سازگاری با محدودیت‌های مرمتی، می‌توانند به بهبود عملکرد انرژی و تصمیم‌گیری در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد کمک کنند.

استناد: زینالی، ام.، محمدزاده.م.، خضرلو. پ.، نوری. (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر معماری بیوفیلیک بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد (مطالعه موردی: خانه کبیری و یوسفی خوی). *فصلنامه معماری و محیط اقلیم سرد*، ۱(۱)، صفحات: ۵۷-۳۲

DOI:

۱- مقدمه

۱-۱-زمینه و ضرورت پژوهش

بافت‌های تاریخی متراکم در اقلیم‌های سرد، به‌ویژه در شهر خوی، در مرز میان دو ضرورت اساسی قرار دارند: حفظ اصالت کالبدی و پاسخ‌گویی به نیازهای معاصر در حوزه انرژی و آسایش حرارتی. این بافت‌ها به دلیل ویژگی‌هایی همچون دیوارهای ضخیم مصالح بنایی، فقدان عایق حرارتی، پنجره‌های تک‌جداره و نفوذپذیری بالای هوا، با اتلاف قابل‌توجه انرژی حرارتی مواجه بوده و در فصل‌های سرد سال وابستگی زیادی به سیستم‌های گرمایشی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی دارند.

مطالعات نشان می‌دهند که این شرایط منجر به افزایش بار حرارتی ساختمان و کاهش سطح آسایش حرارتی ساکنان می‌شود (Movahed et al., 2021). در سطح جهانی نیز ساختمان‌ها سهم قابل‌توجهی از مصرف انرژی و انتشار کربن را به خود اختصاص می‌دهند و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی در بافت‌های موجود، به‌ویژه بافت‌های تاریخی، یکی از چالش‌های اصلی توسعه پایدار شهری محسوب می‌شود.

ازسوی‌دیگر، محدودیت‌های حفاظتی در این بافت‌ها امکان استفاده از راهکارهای متداول بهینه‌سازی انرژی را که نیازمند مداخلات ساختاری گسترده هستند، به‌شدت محدود می‌کند. این محدودیت‌ها ناشی از ضرورت حفظ اصالت تاریخی، ارزش‌های فرهنگی و یکپارچگی کالبدی بناهاست، بنابراین؛ هرگونه مداخله باید به‌گونه‌ای طراحی شود که حداقل تغییر فیزیکی را ایجاد کرده و درعین‌حال بیشترین اثر عملکردی را داشته باشد.

در این راستا، رویکردهای مبتنی بر طبیعت، به‌ویژه معماری بیوفیلیک، به‌عنوان یکی از راهکارهای نوین در بهبود هم‌زمان عملکرد انرژی و کیفیت محیطی مطرح شده‌اند. این رویکرد با ادغام عناصر طبیعی در محیط ساخته‌شده، از طریق سازوکارهایی مانند سایه‌اندازی، تعدیل خرد اقلیم، افزایش مقاومت حرارتی پوسته و بهبود جریان هوا، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی ایفا کند.

باوجود رشد مطالعات در زمینه سامانه‌های سبز و معماری بیوفیلیک (Raji et al., 2015; Vijayaraghavan, 2016 ؛ Browning & Ryan, 2020; Nitu et al., 2022)، هنوز بررسی‌های کافی درباره عملکرد این رویکرد در بافت‌های تاریخی اقلیم سرد وجود ندارد. به‌ویژه، تحلیل هم‌زمان اثرات انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی حیاط محور کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

۱-۲-بیان مسئله و خلأ پژوهش

از منظر پژوهشی، خلأ موجود در مطالعات پیشین به عدم تلفیق سه حوزه کلیدی شامل عملکرد انرژی در بافت‌های تاریخی، راهکارهای طبیعت‌محور و تحلیل هم‌زمان آسایش حرارتی بازمی‌گردد. این شکاف موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های طراحی در چنین زمینه‌هایی فاقد چارچوب تحلیلی یکپارچه باشد.

بنابراین، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد، از یک‌سو کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی ضروری است و ازسوی‌دیگر، محدودیت‌های مرمتی و ضرورت حفظ اصالت کالبدی، امکان استفاده از بسیاری از راهکارهای متداول و مداخله‌گر بهسازی انرژی را محدود می‌کند. خلأ اصلی پژوهش نیز در نبود شواهد کمی و یکپارچه درباره کارایی مداخلات بیوفیلیک کم مداخله، مانند حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز، در بهبود هم‌زمان عملکرد انرژی و آسایش حرارتی خانه‌های تاریخی اقلیم سرد است.

۱-۳- هدف وپرسش پژوهش

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر مداخلات بیوفیلیک کم‌مداخله بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی شهر خوی انجام شده است. در این مطالعه، دو نمونه موردی شامل خانه کبیری و خانه یوسفی، به‌عنوان نماینده تیپولوژی غالب خانه‌های تاریخی حیاط‌محور منطقه، انتخاب شده‌اند و با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی و عمل‌گرایانه، اثر سناریوهای بیوفیلیک بر عملکرد انرژی، ساعات آسایش حرارتی و کیفیت محیطی بنا بررسی شده است.

از نظر روش‌شناختی، پژوهش حاضر یک مطالعه سناریویی مبتنی بر شبیه‌سازی است. هدف از شبیه‌سازی، پیش‌بینی دقیق و مطلق مصرف واقعی انرژی در دو بنای مورد مطالعه نیست، بلکه مقایسه نسبی عملکرد سناریوهای مختلف مداخله و ارائه چارچوبی برای تصمیم‌گیری در انتخاب راهکارهای بیوفیلیک متناسب با شرایط اقلیمی، عملکرد انرژی و محدودیت‌های حفاظتی بناهای تاریخی است. ازاین‌رو، خروجی‌های شبیه‌سازی باید به‌عنوان مبنایی برای مقایسه سناریوها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری طراحی تفسیر شوند، نه به‌عنوان پیش‌بینی قطعی رفتار انرژی بناها.

بر این اساس، پرسش اصلی پژوهش این است که: کاربست سناریوهای بیوفیلیک کم‌مداخله در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد خوی، چگونه و تا چه میزان می‌تواند در عین رعایت محدودیت‌های مرمتی و حفظ اصالت کالبدی، به بهبود نسبی عملکرد انرژی، افزایش ساعات آسایش حرارتی و ارتقای کیفیت محیطی بنا منجر شود؟

۲- پیشینه

۲-۱-عملکرد انرژی در بافت‌های تاریخی اقلیم سرد

بافت‌های تاریخی در اقلیم‌های سرد به دلیل ویژگی‌های کالبدی خاص خود، از جمله جرم حرارتی بالا در کنار فقدان عایق حرارتی مؤثر، با چالش جدی در زمینه اتلاف انرژی مواجه هستند. این نوع بافت‌ها معمولاً دارای دیوارهای ضخیم بنایی، پنجره‌های تک‌جداره و نفوذپذیری بالای هوا هستند که موجب افزایش بار گرمایشی در فصل سرد می‌شوند(Movahed et al., 2021)

باوجوداینکه برخی مطالعات به نقش مثبت جرم حرارتی در تعدیل نوسانات دمایی اشاره کرده‌اند، شواهد نشان می‌دهد که این ویژگی به‌تنهایی برای تأمین آسایش حرارتی در شرایط اقلیمی امروزی کافی نیست. ازسوی‌دیگر، محدودیت‌های حفاظتی در این بافت‌ها امکان استفاده از راهکارهای مداخله‌گر نظیر عایق‌کاری گسترده یا تغییر در پوسته ساختمان را به‌شدت محدود می‌کند. این موضوع باعث شده است که رویکردهای غیرمخرب و کم مداخله به‌عنوان یک جهت‌گیری ضروری در پژوهش‌های اخیر مطرح شوند.

۲-۲ -سامانه‌های سبز و عملکرد انرژی ساختمان

سامانه‌های سبز شامل بام سبز، دیوار سبز و سطوح گیاهی در سال‌های اخیر به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها موردتوجه قرار گرفته‌اند. مطالعات تجربی نشان می‌دهند که این سامانه‌ها از طریق مکانیسم‌هایی مانند سایه‌اندازی، تبخیر - تعرق، کاهش دمای سطحی و افزایش مقاومت حرارتی، می‌توانند موجب کاهش قابل‌توجه بار انرژی ساختمان شوند (Raji et al., 2015; Vijayaraghavan, 2016).

همچنین پژوهش‌های انجام‌شده در اقلیم‌های سرد، بخش عمده اتلاف انرژی ساختمان‌های مسکونی به عملکرد نامناسب پوسته، جدارهای شفاف و نفوذ هوا مربوط است. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که به‌کارگیری راهکارهای طراحی غیرفعال مانند بهبود عایق‌کاری، ارتقای کیفیت پنجره‌ها و بهره‌گیری از تابش خورشیدی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی و بار گرمایشی ایفا کند (حق‌پرست و همکاران، ۱۴۰۴).

بااین‌حال، بررسی دقیق ادبیات نشان می‌دهد که اکثر این مطالعات بر ساختمان‌های جدید یا اقلیم‌های گرم متمرکز بوده‌اند. این تمرکز موجب ایجاد یک محدودیت جدی در تعمیم نتایج به بافت‌های تاریخی و اقلیم‌های سرد شده است. علاوه بر این، بسیاری از پژوهش‌ها سامانه‌های سبز را به‌صورت منفرد بررسی کرده‌اند، درحالی‌که اثرات ترکیبی و هم‌افزای این عناصر کمتر مورد تحلیل قرار گرفته است. این مسئله نشان‌دهنده یک خلأ روش‌شناختی در ادبیات موجود است.

۲-۳-معماری بیوفیلیک و نقش آن در بهبود عملکرد محیطی

معماری بیوفیلیک بر پایه نظریه «گرایش ذاتی انسان به طبیعت (Wilson, 1984) «شکل‌گرفته و توسط(Kellert,1993) در حوزه معماری توسعه‌یافته است. این رویکرد بر ادغام عناصر طبیعی در محیط ساخته‌شده باهدف ارتقای سلامت، آسایش و کیفیت تجربه فضایی تأکید دارد.

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که معماری بیوفیلیک علاوه بر اثرات روان‌شناختی و ادراکی، می‌تواند بر عملکرد انرژی ساختمان نیز اثرگذار باشد. این اثرات عمدتاً از طریق بهبود تهویه طبیعی، کاهش بار تابشی، تعدیل خرد اقلیم و افزایش کارایی حرارتی پوسته ساختمان تحقق می‌یابد Browning & Ryan (2020)و Nitu et al. (2022) .

بااین‌وجود، اغلب پژوهش‌های موجود بر ساختمان‌های معاصر تمرکز داشته‌اند و کاربرد این رویکرد در بافت‌های تاریخی، به‌ویژه در اقلیم‌های سرد، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲-جمع‌بندی و شکاف پژوهش

مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه حوزه اصلی شامل «بهینه‌سازی انرژی در بافت‌های تاریخی»، «راهکارهای سبز در ساختمان» و «معماری بیوفیلیک» هرکدام به‌صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بااین‌حال، تعامل هم‌زمان این سه حوزه در یک چارچوب یکپارچه، به‌ویژه در خانه‌های تاریخی واقع در اقلیم‌های سرد، کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

به طور مشخص، شکاف‌های زیر قابل‌شناسایی است:

۱. فقدان مطالعات یکپارچه در زمینه اثر هم‌زمان راهکارهای بیوفیلیک و عملکرد انرژی در بافت‌های تاریخی
۲. تمرکز غالب پژوهش‌ها بر ساختمان‌های جدید و اقلیم‌های گرم
۳. کمبود تحلیل ترکیبی بین عملکرد انرژی و کیفیت ادراکی در محیط‌های میراثی

این شکاف‌ها نشان می‌دهد که هنوز یک چارچوب تحلیلی جامع برای ارزیابی مداخلات بیوفیلیک در بافت‌های تاریخی اقلیم سرد شکل نگرفته است، بنابراین؛ پژوهش حاضر تلاش می‌کند این خلأ را از طریق تحلیل سناریوهای مداخله بیوفیلیک و ارزیابی هم‌زمان عملکرد انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی شهر خوی پر کند؛ به‌گونه‌ای که شکاف شناسایی‌شده صرفاً در سطح نظری باقی نمانده و در ادامه مقاله از طریق تعریف سناریوهای مداخله بیوفیلیک، شبیه‌سازی انرژی، سنجش آسایش حرارتی و رتبه‌بندی چندمعیاره سناریوها دنبال می‌شود.

۳- چهارچوب نظری پژوهش

۳-۱- نظریه بیوفیلیا و بنیان‌های شناختی آن

نظریه بیوفیلیا نخستین‌بار توسط Wilson (1984) مطرح شد و بیان می‌کند که انسان‌ها دارای گرایش ذاتی و تکاملی به ارتباط با طبیعت هستند. این ارتباط نه‌تنها در سطح روان‌شناختی، بلکه در رفتار فضایی و ادراک محیطی انسان نیز اثرگذار است.

در ادامه، Kellert (1993; 2011) این مفهوم را در حوزه معماری توسعه داد و آن را به‌عنوان چارچوبی برای طراحی محیط‌های ساخته‌شده مبتنی بر عناصر طبیعی معرفی کرد. در این رویکرد، طبیعت نه‌تنها به‌عنوان عنصر زیبایی‌شناختی، بلکه به‌عنوان عامل مؤثر در سلامت، آسایش و عملکرد محیطی ساختمان در نظر گرفته می‌شود.

اثر معماری بیوفیلیک بر عملکرد انرژی ساختمان از طریق مجموعه‌ای از سازوکارهای فیزیکی و اقلیمی قابل‌تبیین است:

- کاهش بار تابشی خورشید :از طریق ایجاد سایه توسط پوشش‌های گیاهی و عناصر سبز
- افزایش مقاومت حرارتی پوسته :به‌واسطهٔ لایه‌های گیاهی در بام و دیوار
- تعدیل خرد اقلیم :از طریق کاهش دمای سطحی و افزایش رطوبت نسبی محیط
- بهبود تهویه طبیعی :در نتیجه تغییر الگوهای جریان هوا در فضاهای نیمه‌باز و حیاط محور

این سازوکارها نشان می‌دهند که اثرات بیوفیلیک صرفاً ادراکی یا روانی نیست، بلکه دارای بنیان فیزیکی و حرارتی قابل‌اندازه‌گیری در مدل‌های شبیه‌سازی انرژی ساختمان است.(Raji et al., 2015; Vijayaraghavan, 2016)

۳-۲- مدل مفهومی پژوهش(Research Conceptual Model)

بر اساس مبانی نظری، مدل مفهومی پژوهش حاضر بر رابطه سه‌گانه زیر استوار است:

۱. ورودی‌ها (مداخلات) **:**حیاط گیاهی، دیوار سبز، بام سبز

۲. سازوکارهای واسط **:**سایه‌اندازی، افزایش مقاومت حرارتی، تعدیل خرد اقلیم، بهبود تهویه طبیعی

۳. خروجی‌ها :کاهش مصرف انرژی، افزایش ساعات آسایش حرارتی، بهبود شرایط محیط حرارتی داخلی این مدل نشان می‌دهد که مداخلات بیوفیلیک نه‌تنها به‌عنوان عناصر طراحی، بلکه به‌عنوان متغیرهای تأثیرگذار بر عملکرد انرژی ساختمان در نظر گرفته می‌شوند**.**

این مدل نشان می‌دهد که مداخلات بیوفیلیک می‌توانند از طریق سازوکارهای فیزیکی و اقلیمی، به بهبود هم‌زمان عملکرد انرژی و آسایش حرارتی در بافت‌های تاریخی منجر شوند.

جدول ۱. چارچوب تلفیقی مؤلفه‌ها، سازوکارها و پیامدهای معماری بیوفیلیک با تأکید بر انرژی و آسایش حرارتی

ردیف	بعد اصلی معماری بیوفیلیک	مؤلفه‌ها و مصادیق طراحی در پژوهش	سازوکار اثرگذاری بر عملکرد انرژی و آسایش حرارتی	پیامد موردانتظار در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد	منابع منتخب
۱	ارتباط مستقیم با طبیعت	حیاط گیاهی، پوشش گیاهی بومی، سطوح نفوذپذیر و منظر طبیعی حیاط	سایه‌اندازی، کاهش دمای سطح، تعدیل خرد اقلیم و تقویت ارتباط بصری با طبیعت	کاهش نسبی بار سرمایشی، بهبود کیفیت محیطی و افزایش‌پذیرش مداخله توسط کاربران	Kellert, 1993; Browning & Ryan, 2020; Nitu et al., 2022
۲	پوسته سبز و بهبود عملکرد حرارتی	بام سبز و دیوار سبز در جداره‌های رو به حیاط	افزایش مقاومت حرارتی پوسته، کاهش شار حرارتی، کاهش جذب تابش و تعدیل دمای سطح خارجی	کاهش بار گرمایشی و سرمایشی، افزایش ساعات آسایش حرارتی و بهبود عملکرد پوسته بنا	Raji et al., 2015; Vijayaraghavan, 2016 ؛ غلامی و همکاران، ۱۴۰۴
۳	نور، سایه و تهویه طبیعی کنترل‌شده	حیاط مرکزی، بازشوهای پیرامون حیاط، سایه‌اندازی گیاهی و جریان هوای طبیعی	کنترل تابش مستقیم، بهبود تهویه طبیعی، کاهش گرمای ناخواسته و ارتقای آسایش بصری	کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی و بهبود شرایط حرارتی - نوری فضاهای داخلی	Ryan & Browning, 2020; Nitu et al., 2022
۴	تجربه ادراکی و کیفیت سکونت	دید به طبیعت، حضور گیاه، مصالح طبیعی، پیوند درون و بیرون	کاهش تنش محیطی، افزایش حس تعلق، تقویت ادراک آسایش و ارتقای کیفیت تجربه فضایی	افزایش رضایت کاربران و تقویت جنبه ادراکی آسایش حرارتی در کنار نتایج شبیه‌سازی	Ulrich, 1993; Gillis & Gatersleben, 2015; Reeve et al., 2015
۵	سازگاری اقلیمی و میراثی	مداخلات کم مداخله، برگشت‌پذیر و هماهنگ با الگوی حیاط محور خانه‌های تاریخی	کاهش نیاز به تغییرات مخرب، حفظ اصالت کالبدی و انطباق با محدودیت‌های مرمتی	امکان‌پذیری اجرای راهکارهای بیوفیلیک در بناهای تاریخی بدون آسیب جدی به ارزش میراثی	Kellert et al., 2011; Beatley, 2016
۶	سازگاری بافرهنگ و بوم	هماهنگی بافرهنگ و بوم محل، انطباق با شرایط سکونتی منطقه	انطباق معماری بیوفیلیک با زمینه فرهنگی، اقلیمی و بومی هر منطقه	امکان‌پذیری اجرای عملکردهای مناسب خانه متناسب با معماری بیوفیلیک و شرایط فرهنگی حاکم بر بوم منطقه	رئیسی و همکاران، ۲۰۲۵؛ بیطرف و همکاران، ۲۰۱۸
۷	ارتقای کیفیت فضاهای مسکونی	بهینه‌سازی و استفاده کاربردی عناصر طبیعی جهت بهره‌وری	افزایش رضایت‌مندی و کیفیت سکونت از طریق تجربه مستقیم عناصر طبیعی	رفاه، سلامت، کیفیت سکونت و آسایش ادراکی کاربران	مجتبوی و تفکری، ۲۰۲۳؛ مقیمی شهری و وفامهر، ۲۰۲۴
۸	چارچوب عملیاتی پژوهش	سناریوهای S1 حیاط گیاهی، S2دیوار سبز،	تبدیل مؤلفه‌های بیوفیلیک به متغیرهای قابل مدل‌سازی از طریق سایه‌اندازی، افزایش	ایجاد پیوند میان مبانی نظری، شبیه‌سازی انرژی،	نگارندگان، بر اساس چارچوب نظری پژوهش

		S3بام سبز و S4 ترکیبی	مقاومت حرارتی و اصلاح پارامترهای خرداقلیمی	آسایش حرارتی و ارزیابی چندمعیاره	

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

مطالعات داخلی نشان می‌دهند که کاربست معماری بیوفیلیک در زمینه مسکونی ایران، افزون بر عملکرد محیطی و کاهش مصرف انرژی، به بومی‌سازی الگوهای طراحی، سازگاری فرهنگی، کیفیت سکونت، سلامت کاربران و شرایط اقلیمی وابسته است؛ ازاین‌رو، منابع داخلی در جدول ۱ برای تقویت پیوند میان چارچوب نظری پژوهش و زمینه مسکونی ایران به کار گرفته شده‌اند. همچنین، ناصری و همکاران (۲۰۲۳) با تبیین مدل نظری نوروبیولوژیک طراحی بیوفیلیک، مؤلفه‌هایی مانند تجربه محسوس و نامحسوس طبیعت، تحریک موزون حسی، نور و تهویه طبیعی، چشم‌انداز و احساس پناه را در تقویت ارتباط انسان با طبیعت مؤثر دانسته‌اند؛ مؤلفه‌هایی که در کنار راهکارهای کالبدی و اقلیمی می‌توانند به ارتقای کیفیت محیط و کاهش وابستگی به مصرف انرژی کمک کنند. بر این اساس، برخلاف رویکردهای صرفاً فناورانه، معماری بیوفیلیک از طریق اصلاح رابطه انسان ـ محیط، می‌تواند به کاهش مصرف انرژی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم منجر شود (Ulrich, 1993; Africa et al., 2019).

۳-۳-تمایز معماری بیوفیلیک از معماری پایدار و سازوکارهای اثرگذاری آن بر کاهش مصرف انرژی

معماری پایدار عمدتاً بر کاهش مصرف انرژی، بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی ساختمان تمرکز دارد و ابزارهای آن بیشتر ماهیت فنی و مهندسی دارند؛ مانند بهبود عایق حرارتی، استفاده از سیستم‌های کارآمد انرژی و کاهش تلفات حرارتی.

در مقابل، معماری بیوفیلیک علاوه بر جنبه‌های عملکردی، بر ایجاد ارتباط مستقیم و غیرمستقیم میان انسان و طبیعت تأکید دارد. در این رویکرد، طبیعت نه‌تنها به‌عنوان یک عامل فیزیکی مؤثر بر عملکرد حرارتی ساختمان، بلکه به‌عنوان یک عامل ادراکی و روانی در ارتقای کیفیت تجربه فضایی کاربران نیز در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین، تفاوت اصلی این دو رویکرد در این است که معماری پایدار بیشتر به «کارایی انرژی» توجه دارد، درحالی‌که معماری بیوفیلیک هم‌زمان دو هدف را دنبال می‌کند:

۱. بهبود عملکرد انرژی ساختمان از طریق راهکارهای طبیعی
۲. ارتقای تجربه ادراکی، روانی و حسی انسان در محیط ساخته‌شده

بر همین اساس، در این پژوهش عناصر سبز مانند حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز صرفاً به‌عنوان راهکارهای فنی کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته نشده‌اند، بلکه به‌عنوان عناصر بیوفیلیک چند عملکردی تحلیل شده‌اند که هم بر عملکرد حرارتی ساختمان اثر دارند و هم موجب تقویت ارتباط انسان با طبیعت در فضای زیستی می‌شوند.

۳-٤- جمع بندی تحلیلی مبانی نظری

مرور مبانی نظری نشان می‌دهد که سه حوزه اصلی شامل معماری بیوفیلیک، سامانه‌های سبز و عملکرد انرژی در بافت‌های تاریخی، تاکنون عمدتاً به‌صورت مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. درحالی‌که در عمل، این سه حوزه دارای هم‌پوشانی عملکردی و مفهومی قابل‌توجهی هستند.

از یک سو، مطالعات حوزه انرژی ساختمان نشان می‌دهد که راهکارهای مبتنی بر عناصر طبیعی مانند پوشش گیاهی، بام سبز و دیوار سبز می‌توانند از طریق کاهش تبادل حرارتی، افزایش مقاومت حرارتی پوسته و تعدیل شرایط خرد اقلیم، موجب کاهش بار گرمایشی و سرمایشی ساختمان شوند. ازسوی‌دیگر، پژوهش‌های حوزه معماری بیوفیلیک نشان می‌دهد که این عناصر علاوه بر نقش حرارتی، دارای اثرات ادراکی، روانی و حسی نیز هستند و می‌توانند کیفیت تجربه فضایی کاربران را بهبود دهند.

بااین‌حال، بررسی ادبیات موجود نشان می‌دهد که اغلب مطالعات یا بر عملکرد انرژی در ساختمان‌های جدید تمرکز داشته‌اند یا صرفاً اثر یک عنصر منفرد (مانند بام سبز) را بررسی کرده‌اند. همچنین، تحلیل هم‌زمان عملکرد انرژی و کیفیت ادراکی در بافت‌های تاریخی اقلیم سرد کمتر موردتوجه قرار گرفته است.

در نتیجه، یک شکاف نظری مهم در ادبیات موجود قابل‌شناسایی است: فقدان یک چارچوب یکپارچه که بتواند هم‌زمان اثرات کالبدی (مصرف انرژی)، محیطی (خرد اقلیم) و ادراکی (کیفیت فضایی) مداخلات بیوفیلیک را در بافت‌های تاریخی تحلیل کند.

بر همین اساس، این پژوهش تلاش می‌کند با تلفیق رویکرد بیوفیلیک و تحلیل انرژی ساختمان، یک چارچوب تحلیلی چندبعدی ارائه دهد که بتواند اثر هم‌زمان مداخلات طبیعت‌محور را در بهبود عملکرد انرژی و آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد تبیین کند.

٤. مواد و روش تحقیق

٤-١- رویکرد و روش تحقیق

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر معماری بیوفیلیک بر کاهش مصرف انرژی و بهبود آسایش حرارتی در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد، با رویکرد ترکیبی کمی–کیفی و ماهیت کاربردی–تحلیلی انجام شده است. بخش کمی پژوهش مبتنی بر شبیه‌سازی انرژی ساختمان و بخش کیفی مبتنی بر ارزیابی ادراکی کاربران و قضاوت خبرگان است.

در بخش کمی، رفتار حرارتی دو نمونه موردی، شامل خانه کبیری و خانه یوسفی، با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و موتور محاسباتی EnergyPlus شبیه‌سازی شد.با توجه به ماهیت تاریخی بناها و محدودیت دسترسی به داده‌های پایش میدانی بلندمدت، مدل‌های انرژی بر اساس اطلاعات مستند کالبدی، داده‌های اقلیمی استاندارد، مطالعات مشابه و فرضیات مهندسی کنترل‌شده توسعه یافتند. بنابراین، نتایج شبیه‌سازی به‌عنوان تحلیل سناریویی و مقایسه‌ای میان وضعیت موجود و مداخلات پیشنهادی تفسیر می‌شود، نه پیش‌بینی قطعی رفتار واقعی بناها. همچنین، به دلیل نبود داده‌های اندازه‌گیری‌شده از مصرف واقعی انرژی و شرایط حرارتی داخلی، امکان کالیبراسیون کامل مدل بر اساس داده‌های میدانی فراهم نبود. ازاین‌رو، اعتبار مدل در این پژوهش از طریق رویکرد اعتبارسنجی مقایسه‌ای انجام شد؛ به این معنا که ویژگی‌های کالبدی، مشخصات حرارتی پوسته و روند تغییرات خروجی‌های شبیه‌سازی با اطلاعات مستند، مطالعات مشابه و منطق فیزیکی رفتار حرارتی بناهای تاریخی اقلیم سرد تطبیق داده شد. بر این اساس، مدل حاضر به‌عنوان ابزاری برای مقایسه نسبی عملکرد سناریوهای مختلف و پشتیبانی از تصمیم‌گیری طراحی مورد استفاده قرار گرفته است.

سناریوهای طراحی شامل پنج وضعیت بود: سناریوی صفر یا وضعیت موجود(S0) ، سه سناریوی مداخله بیوفیلیک شامل حیاط گیاهی (S1)، دیوار سبز (S2) و بام سبز(S3) ، و یک سناریوی ترکیبی (S4) شامل اعمال هم‌زمان سه مداخله یادشده. شاخص‌های ارزیابی شامل بار گرمایشی سالانه، بار سرمایشی سالانه، مصرف نهایی انرژی، دمای عملیاتی داخلی و درصد ساعات آسایش حرارتی بود. اثر عناصر بیوفیلیک در مدل از طریق پارامترهای معادل حرارتی، سایه‌اندازی مؤثر، افزایش مقاومت حرارتی پوسته و اصلاح شرایط خرداقلیمی لحاظ شد.

در این پژوهش، با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی سامانه‌های زنده گیاهی، فرآیندهای فیزیولوژیک شامل تبخیر–تعرق، رشد گیاه، تغییرات فصلی تراکم پوشش گیاهی و تغییرات زمانی سطح سایه‌انداز به‌صورت مستقیم در مدل EnergyPlus شبیه‌سازی نشدند. در عوض، اثرات حرارتی عناصر گیاهی از طریق پارامترهای معادل شامل سایه‌اندازی، افزایش مقاومت حرارتی پوسته، کاهش دمای سطح و اصلاح شرایط خرداقلیمی اعمال شد. بنابراین، نتایج حاصل نشان‌دهنده ظرفیت عملکردی نسبی سناریوهای بیوفیلیک در شرایط تعریف‌شده مدل بوده و برای تعمیم رفتار واقعی پوشش گیاهی در طول سال، نیازمند مطالعات میدانی و پایش فصلی خواهد بود.

به‌منظور شفاف‌سازی فرایند مدل‌سازی، پارامترهای فنی پوسته و نحوه اعمال سناریوهای بیوفیلیک در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر حرارتی اجزای پوسته، شامل U-value و مشخصات انتقال حرارت، به‌صورت معادل و بر اساس ویژگی‌های کالبدی دو نمونه موردی، منابع مشابه و فرضیات مهندسی کنترل‌شده تعیین شدند. با توجه به نبود داده‌های پایش مستمر، این مقادیر به‌عنوان داده‌های کالیبره‌شده قطعی در نظر گرفته نشده و صرفاً برای مقایسه عملکرد نسبی سناریوها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در ادامه، برای شفاف‌سازی نحوه تعریف پارامترهای حرارتی مدل، مقادیر مربوط به پوسته و شرایط مرزی ساختمان بررسی شد. با توجه به ماهیت تاریخی بناها، این پارامترها به‌صورت معادل و بر اساس ویژگی‌های کالبدی، منابع مشابه و فرضیات مهندسی کنترل‌شده تعیین شدند. ازاین‌رو، اعتبار مدل در این پژوهش بر اساس رویکرد اعتبارسنجی مقایسه‌ای و روندی انجام شد. در این فرآیند، ابتدا ویژگی‌های کالبدی و حرارتی مدل پایه با اطلاعات مستند از مصالح، ساختار پوسته و ویژگی‌های معماری بناهای تاریخی اقلیم سرد تطبیق داده شد. سپس پارامترهای اصلی مدل شامل U-value پوسته، جرم حرارتی و نرخ نفوذ هوا با دامنه‌های گزارش‌شده در مطالعات مشابه ساختمان‌های سنتی و تاریخی اقلیم سرد مقایسه گردید. در مرحله بعد، منطقی بودن روند تغییرات خروجی‌های شبیه‌سازی میان وضعیت موجود و

سناریوهای مداخله بررسی شد. بر این اساس، نتایج مدل حاضر به‌عنوان پیش‌بینی مطلق مصرف انرژی تلقی نشده، بلکه به‌عنوان ابزاری برای مقایسه سناریوها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری طراحی تفسیر می‌شود.

در بخش کیفی، ادراک کاربران نسبت به کیفیت فضایی، کیفیت محیطی، آسایش حرارتی ادراکی و میزان پذیرش مداخلات طراحی با استفاده از پرسشنامه پنج‌درجه‌ای لیکرت ارزیابی شد. جامعه آماری این بخش شامل کاربران، ساکنان محدوده بافت تاریخی، بهره‌برداران و افراد دارای آشنایی نسبی با خانه‌های سنتی شهر خوی بود. با توجه به ماهیت پژوهش و هدف بررسی ادراک محیطی کاربران نسبت به مداخلات بیوفیلیک، نمونه‌ها از میان افرادی انتخاب شدند که تجربه حضور یا آشنایی با فضاهای تاریخی مورد مطالعه را داشتند.

نمونه‌گیری به روش تصادفی ساده انجام شد و تعداد ۱۲۰ پرسشنامه قابل تحلیل جمع‌آوری گردید. انتخاب پاسخ‌دهندگان از میان افراد حاضر در محدوده بافت تاریخی خوی و افرادی که سابقه حضور یا تجربه استفاده از فضاهای تاریخی مورد مطالعه را داشتند، انجام شد. معیارهای ورود به مطالعه شامل سابقه حضور در محدوده تاریخی خوی، آشنایی نسبی با ویژگی‌های معماری سنتی منطقه و تمایل به مشارکت در پژوهش بود. پس از بررسی معیارهای ورود، پرسشنامه‌ها به‌صورت حضوری در اختیار مشارکت‌کنندگان قرار گرفت و پیش از تکمیل، هدف پژوهش و نحوه پاسخ‌گویی برای آنان توضیح داده شد. انتخاب این گروه از پاسخ‌دهندگان با هدف دستیابی به ارزیابی ادراکی نزدیک‌تر به تجربه واقعی کاربران از کیفیت محیطی بناهای تاریخی انجام گرفت.

برای بررسی روایی محتوایی پرسشنامه و انجام تصمیم‌گیری چندمعیاره، از نظر ۱۰ نفر از خبرگان حوزه معماری، انرژی ساختمان و مرمت بناهای تاریخی استفاده شد. خبرگان دارای سابقه علمی یا حرفه‌ای مرتبط با طراحی معماری، ارزیابی انرژی ساختمان یا حفاظت بناهای تاریخی بودند.این خبرگان به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند و وظیفه آنان شامل ارزیابی گویه‌های پرسشنامه از نظر وضوح، تناسب و کفایت، همچنین انجام مقایسات زوجی برای رتبه‌بندی سناریوهای مداخله با روش ANP بود.

پایایی پرسشنامه با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ در نرم‌افزار SPSS بررسی شد و مقدار آلفای کل برابر با ۰/۸۷۶ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی قابل قبول ابزار تحقیق است. در بررسی اولیه، شاخص «کیفیت کالبدی–محیطی» به دلیل پایایی پایین(α= ۰/۲۱۵) و همپوشانی مفهومی با سایر ابعاد، به‌صورت مستقل وارد تحلیل نهایی نشد و متغیرهای مرتبط در قالب شاخص‌های تلفیقی بازتعریف شدند.

در نهایت، پژوهش حاضر چارچوبی سه‌لایه شامل تحلیل زمینه‌ای، شبیه‌سازی عملکرد انرژی و تصمیم‌گیری چندمعیاره (ANP) برای ارزیابی مداخلات بیوفیلیک در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد ارائه می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای فنی مدل‌سازی انرژی و سناریوهای بیوفیلیک

بخش	پارامتر	مقدار / نحوه اعمال در مدل	مبنای تعیین پارامترهای مدل‌سازی
ابزار شبیه‌سازی	نرم‌افزار	DesignBuilderبا موتورEnergyPlus	بر اساس قابلیت نرم‌افزار DesignBuilder و موتور EnergyPlus در شبیه‌سازی انرژی ساختمان
نوع تحلیل	ماهیت مدل‌سازی	شبیه‌سازی سناریو محور و مقایسه‌ای، بدون کالیبراسیون کامل میدانی	متناسب با هدف پژوهش و مقایسه نسبی سناریوهای مداخله، بدون هدف پیش‌بینی قطعی مصرف واقعی
دیوار خارجی	مصالح و ضخامت	مصالح بنایی سنتی شامل آجر، خشت و ملات؛ ضخامت تقریبی ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر	بر اساس برداشت کالبدی بنا، ویژگی مصالح سنتی موجود و مطالعات مشابه خانه‌های تاریخی اقلیم سرد
دیوار خارجی	U-value معادل	خانه کبیری: حدود ۰/۷۵ W/m^2K؛ خانه یوسفی: حدود ۰/۹۰ W/m^2K	بر اساس ضخامت دیوار، نوع مصالح سنتی (آجر، خشت و ملات) و مقایسه با مطالعات مشابه بناهای تاریخی اقلیم سرد
سقف	ساختار و-U valueمعادل	تیر چوبی، خاک و پوشش سنتی؛ U-value معادل حدود ۰/۹۰ W/m^2K تا ۱/۰۰	بر اساس ساختار تیرچوبی، خاک و پوشش سنتی بام‌های تاریخی منطقه
سقف	شیب	کم‌شیب/تقریباً مسطح، مطابق الگوی بام‌های سنتی منطقه؛ شیب تقریبی کمتر از ۵ درصد	بر اساس الگوی بام‌های سنتی منطقه خوی و ویژگی معماری بناهای مورد مطالعه
پنجره	نوع و مشخصات حرارتی	پنجره چوبی تک‌جداره U≈ ۵/۲W/m^2K- و SHGC≈ ۰/۷۸	بر اساس پنجره چوبی تک‌جداره موجود در بناهای تاریخی
نفوذ هوا	ACH	حدود ۱/۲۵ بار تعویض هوا در ساعت؛ ثابت در همه سناریوها	بر اساس ویژگی نفوذپذیری بازشوها و درزهای ساختمان‌های تاریخی

S0	وضعیت موجود	بدون مداخله بیوفیلیک	بر اساس شرایط فعلی بنا بدون اعمال تغییرات کالبدی یا عناصر بیوفیلیک
S1	حیاط گیاهی	پوشش گیاهی بومی، مقاوم به سرمای زمستان و نیاز آبی پایین، همراه با سطوح نفوذپذیر؛ مدل‌سازی از طریق سایه‌اندازی، کاهش دمای سطحی و تعدیل خرد اقلیم	بر اساس انتخاب گونه‌های مقاوم به سرما، ویژگی پوشش گیاهی بومی و اثرات حرارتی معادل قابل مدل‌سازی
S2	دیوار سبز	دیوار سبز سبک/ماژولار در جداره‌های رو به حیاط؛ افزایش R-value معادل حدود ۰/۴۰ m^2K/W	بر اساس مطالعات سامانه‌های دیوار سبز سبک و مقدار مقاومت حرارتی معادل گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه
S3	بام سبز	بام سبز سبک/گسترده با بستر ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، خاک سبک به همراه لایه زهکشی و فیلتر، و پوشش گیاهی کوتاه ریشه، مقاوم به سرما و کم آب‌بر	بر اساس ویژگی بام سبز گسترده سبک، محدودیت‌های سازه‌ای بناهای تاریخی و مطالعات مشابه
بام سبز – شرایط نگهداری و آبیاری	شرایط نگهداری و آبیاری	آبیاری محدود، فصلی یا قطره‌ای باهدف کاهش ریسک رطوبت برای بنای تاریخی	بر اساس الزامات حفاظت بناهای تاریخی، کنترل رطوبت پوسته سنتی و شرایط نگهداری سامانه‌های سبز در اقلیم سرد
S4	سناریوی ترکیبی	ترکیب هم‌زمان حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز	بر اساس ترکیب هم‌زمان سه مداخله S1 ، S2و S3برای ارزیابی اثر تجمعی عناصر بیوفیلیک

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

توضیح :مقادیر حرارتی جدول به‌صورت معادل و بر اساس مشخصات کالبدی بناها، منابع مشابه و فرضیات مهندسی کنترل‌شده تعریف شده‌اند. به دلیل نبود داده‌های پایش میدانی بلندمدت، این مقادیر به‌عنوان داده‌های کالیبره شده قطعی تلقی نمی‌شوند و نتایج شبیه‌سازی صرفاً برای مقایسه نسبی سناریوها تفسیر می‌شود. در مدل‌سازی سناریوهای بیوفیلیک، اثر مداخلات گیاهی به‌صورت معادل‌سازی حرارتی و خرداقلیمی در مدل اعمال شد؛ به‌گونه‌ای که حیاط گیاهی از طریق سایه‌اندازی مؤثر، کاهش دمای سطحی و تعدیل خرد اقلیم حیاط، دیوار سبز از طریق افزایش مقاومت حرارتی معادل جداره و کاهش تبادل حرارتی سطح دیوارهای رو به حیاط، و بام سبز سبک/گسترده از طریق افزایش R-value سقف، کاهش U-value معادل و کاهش دمای سطح بام مدل‌سازی شد. برای بام سبز، بستر کشت ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، خاک سبک با زهکشی مناسب، پوشش گیاهی کوتاه ریشه، مقاوم به سرما و کم آب‌بر، و آبیاری محدود، فصلی یا قطره‌ای در نظر گرفته شد. الگوریتم‌های فیزیولوژیک مستقل مربوط به تبخیر - تعرق گیاهان و تغییرات پویای سایه‌اندازی ناشی از رشد یا تغییرات فصلی پوشش گیاهی به‌صورت مستقیم مدل‌سازی نشدند، بلکه اثر آن‌ها در قالب پارامترهای معادل، شامل کاهش دمای سطحی، تعدیل خرد اقلیم، سایه‌اندازی مؤثر و افزایش مقاومت حرارتی معادل لحاظ شد. همچنین، نرخ تعویض هوا (ACH) در همه سناریوها ثابت در نظر گرفته شد تا اثر مداخلات بیوفیلیک به‌اشتباه به‌عنوان اصلاح واقعی درزبندی یا کاهش نفوذ هوا تفسیر نشود. با توجه به محدودیت‌های مدل‌سازی سامانه‌های زنده گیاهی، فرآیندهای فیزیولوژیک شامل تبخیر–تعرق، تغییرات تراکم پوشش گیاهی، رشد فصلی گیاهان و تغییرات زمانی سطح سایه‌انداز به‌صورت مستقیم در مدل EnergyPlus شبیه‌سازی نشدند. در این پژوهش، اثرات حرارتی گیاهان از طریق پارامترهای معادل شامل کاهش دمای سطح، سایه‌اندازی مؤثر، تعدیل خرداقلیم و افزایش مقاومت حرارتی پوسته اعمال شد. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده باید به‌عنوان ارزیابی عملکرد نسبی سناریوهای بیوفیلیک تفسیر شوند و نه پیش‌بینی دقیق رفتار زیستی پوشش گیاهی در طول سال.

با توجه به شرایط اقلیمی سرد شهر خوی، عملکرد واقعی عناصر گیاهی می‌تواند تحت تأثیر عوامل فصلی مانند دوره خواب گیاه، یخبندان، میزان تراکم پوشش و شرایط نگهداری قرار گیرد. در این پژوهش، این عوامل به‌صورت مستقیم در مدل فیزیولوژیک گیاه وارد نشده‌اند و اثر آن‌ها در قالب پارامترهای معادل حرارتی و خرداقلیمی اعمال شده است. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده ظرفیت عملکردی سناریوهای بیوفیلیک در شرایط تعریف‌شده مدل هستند و در کاربرد واقعی نیازمند بررسی‌های تکمیلی شامل پایش فصلی پوشش گیاهی و ارزیابی میدانی عملکرد سامانه‌های سبز خواهند بود.

با توجه به ماهیت سناریومحور پژوهش و محدودیت‌های موجود در فرایند مدل‌سازی، نتایج شبیه‌سازی باید با احتیاط تفسیر شوند. مهم‌ترین محدودیت‌ها و ملاحظات مربوط به تفسیر خروجی‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. محدودیت‌های مدل‌سازی و نکات احتیاطی

محدودیت مدل‌سازی	نکته احتیاطی در تفسیر نتایج
نبود داده‌های پایش میدانی بلندمدت برای کالیبراسیون کامل مدل	مقادیر شبیه‌سازی‌شده نباید به‌عنوان پیش‌بینی قطعی مصرف واقعی انرژی بناها تلقی شوند و بیشتر برای مقایسه نسبی سناریوها کاربرد دارند.
تعیین برخی ویژگی‌های حرارتی پوسته بر اساس مشخصات کالبدی بنا، منابع مشابه و فرضیات مهندسی کنترل‌شده	مقادیر بار حرارتی و مصرف انرژی دارای عدم‌قطعیت بوده و باید در چارچوب تحلیل سناریویی تفسیر شوند.
مدل‌سازی مداخلات بیوفیلیک از طریق پارامترهای حرارتی و خرداقلیمی معادل	عملکرد واقعی پوشش گیاهی ممکن است تحت‌تأثیر نوع گیاه، تراکم پوشش، شرایط نگهداری و تغییرات فصلی متفاوت باشد.
عدم مدل‌سازی مستقیم فرایندهای فیزیولوژیک گیاهان مانند تبخیر–تعرق و تغییرات پویای سایه‌اندازی	اثرات واقعی عناصر گیاهی ممکن است در طول فصل‌ها با مقادیر شبیه‌سازی شده تفاوت داشته باشد.
ثابت در نظر گرفتن نرخ تعویض هوا (ACH) در همه سناریوها	کاهش مصرف انرژی ناشی از سناریوهای بیوفیلیک نباید به بهبود درزبندی یا کاهش واقعی نفوذ هوا نسبت داده شود.
تمرکز مطالعه بر دو خانه تاریخی در شهر خوی	تعمیم نتایج به سایر بناهای تاریخی و اقلیم‌های سرد نیازمند بررسی‌های موردی و کالیبراسیون محلی است.

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

به‌ویژه در اقلیم سرد خوی، دوره‌های طولانی یخبندان و کاهش فعالیت زیستی گیاهان در فصل سرد می‌تواند بر میزان واقعی اثرگذاری سامانه‌های سبز تأثیرگذار باشد؛ ازاین‌رو، بررسی‌های میدانی فصلی برای تعیین دقیق‌تر عملکرد این عناصر پیشنهاد می‌شود.

٤-٢- قلمرو پژوهش

قلمرو مکانی پژوهش حاضر، بافت تاریخی شهر خوی در استان آذربایجان غربی است. این شهر با قرارگیری در حدود ۳۸ درجه عرض شمالی و ۴۵ درجه طول شرقی و در ارتفاع ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر از سطح دریا، تحت‌تأثیر اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار دارد. زمستان‌های سرد و طولانی و نوسانات دمایی محسوس، موجب شکل‌گیری معماری بومی متراکم، درون‌گرا و دارای جرم حرارتی بالا در بافت تاریخی خوی شده است.

بافت تاریخی خوی، هسته اولیه شهر، با شبکه فشرده معابر باریک، جداره‌های پیوسته و خانه‌های حیاط‌دار، شرایط خرداقلیمی را تعدیل، تهویه طبیعی را تسهیل و تبادل حرارتی با بیرون را کاهش می‌دهد. دیوارهای ضخیم، بازشوهای محدود و مصالح سنگین (آجر و خشت) با سازه دیوار باربر، پاسخ اصلی به اقلیم سرد و نیمه‌خشک بوده و اتلاف حرارتی زمستانی را به حداقل می‌رساند.

باوجوداین ظرفیت‌های بومی، فرسودگی کالبدی و مداخلات ناهماهنگ دهه‌های اخیر، کیفیت زیست و مصرف انرژی را کاهش داده است. ازاین‌رو، این بافت متراکم با بناهای ارزشمند، گذرهای قدیمی و فضاهای سنتی مذهبی - تجاری بستری ایده‌آل برای مداخلات کم‌اثر و سازگار با میراث، به‌ویژه رویکرد بیوفیلیک، محسوب می‌شود تا عملکرد انرژی و آسایش حرارتی ارتقا یابد.

٤-٣- معرفی بناهای مورد مطالعه

در این پژوهش، به‌منظور شباهت تیپولوژیک، تعلق به دوره قاجار، و نمایندگی مناسب از خانه‌های حیاط محور اقلیم سرد خوی، دو بنای تاریخی شاخص به‌عنوان نمونه‌های موردی انتخاب شده‌اند: خانه کبیری و خانه یوسفی. این دو بنا از نظر الگوی فضایی، نوع مصالح، پاسخ اقلیمی و ارزش‌های میراثی، نماینده تیپ غالب خانه‌های تاریخی خوی محسوب می‌شوند.

- **معرفی خانه کبیری و یوسفی**

خانه‌های کبیری و یوسفی از بناهای تاریخی دوره قاجار در بافت قدیمی شهر خوی هستند که به دلیل برخورداری از الگوی درون‌گرا، سازمان‌دهی فضایی پیرامون حیاط مرکزی، مصالح بنایی سنگین و ارزش‌های میراثی، به‌عنوان نمونه‌های موردی پژوهش انتخاب شدند. این دو بنا با دیوارهای ضخیم آجری و خشتی، سقف‌های چوبی با پوشش سنتی، بازشوهای چوبی تک‌جداره و ارتباط کنترل‌شده با فضای باز، نماینده‌ای مناسب از خانه‌های تاریخی حیاط محور در اقلیم سرد خوی به شمار می‌روند.

خانه کبیری به دلیل قرارگیری در بافت فشرده و مجاورت با گذرهای سنتی، امکان بررسی اثر مداخلات بیوفیلیک در شرایط متراکم و میراثی را فراهم می‌کند. خانه یوسفی نیز به‌واسطهٔ ضعف نسبی عملکرد حرارتی بازشوها و ضرورت مداخله حداقلی، برای تحلیل هم‌زمان کاهش مصرف انرژی، حفظ اصالت کالبدی و مقایسه با خانه کبیری انتخاب شده است. براین‌اساس، مقایسه این دو نمونه امکان ارزیابی اثر حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز را در دو وضعیت متفاوت اما هم‌خانواده از نظر تیپولوژی تاریخی فراهم می‌سازد.

٤-٤- ویژگی های اقلیمی منطقه و تأثیر آن بر معماری

شهر خوی بر اساس تقسیم‌بندی‌های اقلیمی ایران در محدوده اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار دارد. این اقلیم با زمستان‌های طولانی، سرد و یخبندان، تابستان‌های نسبتاً کوتاه و گرم، و اختلاف دمای شب‌وروز قابل‌توجه شناخته می‌شود. شرایط اقلیمی خوی یکی از عوامل اصلی

شکل‌گیری الگوی معماری بومی، فرم شهری فشرده و استفاده از مصالح با جرم حرارتی بالا در بناهای تاریخی این شهر بوده است، تا نوسانات دمایی شدید را تعدیل کند.

اقلیم خوی طبق داده‌های اقلیمی و طبقه‌بندی مهدویان و پرهیز (۱۴۰۳) و مستندات گزارش رسمی، سرد و نیمه‌خشک است؛ یعنی:

جدول ۳: داده های اقلیمی خوی

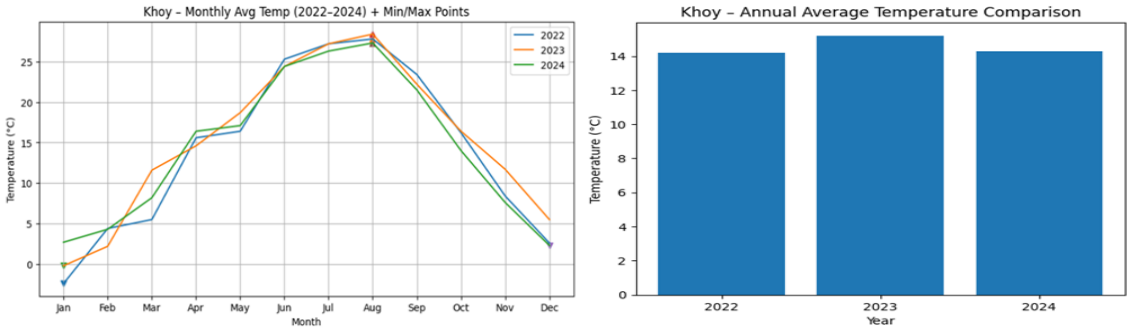
شاخص اقلیمی	مقدار تقریبی
زمستان	بسیار سرد، یخ‌بندان طولانی‌مدت
تابستان	گرم اما کوتاه‌تر از زمستان
بارش سالانه	کم تا متوسط - همراه با رطوبت ناگهانی در فصول سرد
میانگین دمای سالانه	C° ۱۴/۲ -۱۵/۲
انرژی حرارتی خانوار	وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی جهت گرمایش

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

جدول ۴. میانگین دمای ماهانه شهر خوی در دوره سه‌ساله

سال \ ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	میانگین سالانه
۲۰۲۲	-۲/۴	۴/۴	۵/۵	۱۵/۶	۱۶/۴	۲۵/۳	۲۷/۲	۲۷/۸	۲۳/۴	۱۶/۲	۸/۴	۲/۶	۱۴/۲
۲۰۲۳	-۰/۲	۲/۲	۱۱/۶	۱۴/۶	۱۸/۷	۲۴/۴	۲۷/۲	۲۸/۴	۲۲/۲	۱۶/۴	۱۱/۷	۵/۵	۱۵/۲
۲۰۲۴	۲/۷	۴/۳	۸/۲	۱۶/۴	۱۷/۱	۲۴/۴	۲۶/۳	۲۷/۳	۲۱/۵	۱۴/۰	۷/۶	۲/۳	۱۴/۳

منبع: Weather & Climate



شکل ۱. جدول میانگین دمای هوای خوی

بررسی جدول فوق نشان می‌دهد که در ماه‌های سرد سال (دی، بهمن و اسفند)، دمای متوسط ماهانه اغلب پایین‌تر از محدوده آسایش حرارتی است. این امر موجب وابستگی شدید ساختمان‌ها به سیستم‌های گرمایشی و افزایش مصرف انرژی فسیلی می‌شود. ازاین‌رو، در اقلیم خوی، کاهش بار گرمایشی اهمیت بسیار بیشتری نسبت به کاهش بار سرمایشی دارد.

این شرایط اقلیمی باعث شده است که معماری سنتی شهر خوی به سمت:

- دیوارهای ضخیم با جرم حرارتی بالا
- فرم درون‌گرا و فشرده
- حیاط‌های مرکزی نیمه فرورفته
- بازشوهای محدود و کنترل‌شده

حرکت کند. این ویژگی‌ها نقش مهمی در کاهش اتلاف حرارتی و تعدیل دمای داخلی ایفا کرده‌اند و بستری مناسب برای مداخلات بیوفیلیک سازگار با اقلیم سرد فراهم می‌کنند.

٤-٥. مشخصات فنی و کالبدی بنا

ویژگی‌های فنی و کالبدی دو بنای موردمطالعه، از جمله نوع مصالح، ضخامت جداره‌ها، مشخصات سقف، پنجره‌ها و نرخ نفوذ هوا، به‌عنوان داده‌های ورودی در شبیه‌سازی انرژی استفاده شد. باتوجه‌به اینکه این مشخصات در جدول ۲ به‌صورت پارامترهای فنی مدل‌سازی ارائه شده‌اند، در این بخش صرفاً بر نقش کالبدی این ویژگی‌ها در رفتار حرارتی بناها تأکید می‌شود. دیوارهای ضخیم، فرم درون‌گرا، حیاط

مرکزی و بازشوهای محدود از عوامل مؤثر در تعدیل دمای داخلی هستند؛ بااین‌حال، پنجره‌های تک‌جداره و نفوذپذیری هوا همچنان از عوامل اصلی افزایش بار گرمایشی در بناهای موردمطالعه محسوب می‌شوند.

٤-٦- شاخص های ارزیابی و خروجی های شبیه سازی:

در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی انرژی ساختمان نمونه در بافت تاریخی خوی، بر مبنای خروجی‌های موتور محاسباتی EnergyPlus در محیط DesignBuilderتحلیل شده است. مهم‌ترین شاخص‌ها عبارت‌اند از:

۱- بار سالانه گرمایش (Heating Load) بر حسب kWh/m².year
۲- بار سالانه سرمایش (Cooling Load) بر حسب kWh/m².year
۳- مصرف کل انرژی نهایی ساختمان(Site Energy Use Intensity – EUI)
۴- توان اوج گرمایشی و سرمایشی(Peak Heating/Cooling Demand)
۵- درصد ساعات آسایش حرارتی در طول سال (Comfort Hours %) بر اساس استاندارد55 ASHRAE
۶- دمای متوسط عملیاتی فضاهای اصلی (Operative Temperature) در ماه‌های منتخب زمستان/تابستان

٤-٧- سناریو های مداخله بیوفیلیک عبارت اند از:

S0:وضعیت موجود (بدون مداخله)
S1:احیای حیاط با پوشش گیاهی بومی و کف نفوذپذیر
S2:افزودن سبزینگی عمودی (دیوار سبز) در جداره داخلی حیاط
S3:اجرای بام سبز نیمه‌سبک با گیاهان سردمقاوم
S4:سناریوی ترکیبی(S1 + S2 + S3)

- سناریوی S0 به‌عنوان وضعیت پایه بدون مداخله تعریف شده و سناریوهای S1 تا S4 به ترتیب شامل مداخلات تدریجی بیوفیلیک برای بررسی اثرات مستقل و ترکیبی هستند.

۱) فرضیات سیستم HVAC و شرایط بهره‌برداری

باتوجه‌به ماهیت بناهای تاریخی و هدف پژوهش در تمرکز بر عملکرد پوسته ساختمان، در شبیه‌سازی EnergyPlus از سیستم بار ایده‌آل (Ideal Loads System) استفاده شد. این فرض امکان حذف اثر بازده و نوع سامانه‌های مکانیکی را فراهم کرده و اثر مداخلات کالبدی و بیوفیلیک را بر بارهای حرارتی ساختمان به‌صورت مستقل‌تر نشان می‌دهد. دمای تنظیمی آسایش حرارتی برای فصل زمستان ۲۰ درجه سانتی‌گراد و برای فصل تابستان ۲۶ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. بارهای داخلی شامل حضور افراد، روشنایی و تجهیزات بر اساس الگوی پیش‌فرض کاربری مسکونی در نرم‌افزار لحاظ گردید. نرخ تعویض هوا (ACH) باتوجه‌به نفوذپذیری بالای بازشوها و درزهای بناهای تاریخی، به‌صورت مقدار پایه حدود ۲۵/۱ بار تعویض هوا در ساعت در نظر گرفته شد و در همه سناریوها ثابت باقی ماند، بنابراین؛ اثر مداخلات بیوفیلیک به‌عنوان اصلاح واقعی درزبندی بنا تلقی نشده و صرفاً از طریق سایه‌اندازی، افزایش مقاومت حرارتی معادل و تعدیل خرد اقلیم مدل‌سازی شده است.

۲) اعتبارسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت

به‌منظور بررسی قابلیت اعتماد نتایج، مدل شبیه‌سازی از طریق مقایسه با داده‌های اقلیمی منطقه و مقادیر مرجع مطالعات مشابه مورد ارزیابی قرار گرفت. باتوجه‌به محدودیت دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری میدانی مستمر در بناهای تاریخی موردمطالعه، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری بلندمدت، مدل‌سازی بر اساس رویکرد شبیه‌سازی سناریویی انجام شده و صحت‌سنجی بر اساس مطالعات مشابه در اقلیم سرد صورت‌گرفته است.

جدول ۵.اعتبارسنجی و نحوه اعمال سناریو ها

سناریو	نحوه اعمال در مدل	اثر فیزیکی لحاظ شده
S0	مدل موجود بدون مداخله	وضعیت پایه
S1:حیاط گیاهی	تعریف سطح نفوذپذیر، سایه‌اندازی گیاهان، کاهش دمای سطح حیاط	تعدیل خرد اقلیم کاهش دمای هوای مجاور بازشوها
S2:دیوار سبز	افزودن لایه معادل حرارتی/سایه روی جداره حیاط	کاهش جذب تابش، افزایش مقاومت حرارتی، کاهش دمای سطح دیوار

S3:بام سبز	افزودن لایه بام سبز با بستر خاک و پوشش گیاهی	کاهش اتلاف حرارت از سقف، تعدیل دمای سطح بام
S4:ترکیبی	اعمال هم‌زمانS1+S2+S3	اثر هم‌افزایی مداخلات

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

جدول ۶:بار سالانه گرمایش و سرمایش خانه کبیری

سناریو	بار گرمایش (kWh/m².year)	بار سرمایش (kWh/m².year)	تغییر گرمایش نسبت به S0	تغییر سرمایش نسبت به S0
S0 – موجود	۱۰۲/۵	۱۰/۰	-	-
S1 – حیاط گیاهی	۹۶/۰	۷/۰	۶٪/۳ کاهش	حدود ۳۰٪ کاهش
S2 – دیوار سبز	۹۸/۰	۸/۰	حدود ۴/۴٪کاهش	حدود ۲۱٪ کاهش
S3 – بام سبز	۹۲/۰	۹/۰	حدود ۱۰/۲٪ کاهش	حدود ۱۰٪ کاهش
S4 – ترکیبی	۸۲/۰	۵/۵	حدود ۲۱٪ کاهش	حدود ۴۵٪ کاهش

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

در اقلیم سرد خوی، کاهش حدود ۲۱ درصدی بار گرمایشی در سناریوی S4 از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی اهمیت دارد. بام سبز با افزایش مقاومت حرارتی و کاهش نوسانات دمایی، و دیوار سبز و حیاط گیاهی از طریق سایه‌اندازی و تعدیل خرد اقلیم، به کاهش بارهای انرژی کمک کرده‌اند. همچنین، سناریوهای سبک‌تر S1 و S2 به دلیل کم مداخله بودن، برای بافت‌های تاریخی واجد ارزش کاربرد بیشتری دارند.

جدول ۷.بار سالانه گرمایش و سرمایش خانه یوسفی

سناریو	بار گرمایش (kWh/m².year)	بار سرمایش (kWh/m².year)	تغییر گرمایش نسبت به S0	تغییر سرمایش نسبت به S0
S0-موجود	۱۴۰/۰	۱۵/۰	-	-
S1-حیاط گیاهی	۱۳۳/۰	۱۲/۰	٪۵ کاهش	٪۲۰ کاهش
S2-دیوار سبز	۱۳۵/۰	۱۲/۵	حدود ۳٪/۶ کاهش	حدود ۱۶٪/۷ کاهش
S3-بام سبز	۱۲۸/۰	۱۳/۵	حدود ۸٪/۶ کاهش	حدود ٪۱۰ کاهش
S4-ترکیبی	۱۱۸/۰	۱۰/۰	حدود ۱۵٪/۷ کاهش	حدود ۳۳٪/۳ کاهش

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

در اقلیم سرد خوی که بار غالب انرژی به گرمایش زمستانه مربوط است، کاهش ۱۵/۷ درصدی بار گرمایشی در سناریوی S4 از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی معنادار است. بام سبز با کاهش نوسانات حرارتی بر بار گرمایشی اثرگذار بوده، درحالی‌که سبزینگی حیاط و دیوار سبز با ایجاد سایه و رطوبت، بار سرمایشی تابستانی را کاهش داده‌اند. همچنین سناریوهای سبک‌تر (S1 و S2) بدون مداخله شدید کالبدی نیز صرفه‌جویی انرژی قابل‌توجهی ایجاد کرده‌اند که برای بافت تاریخی اهمیت بالایی دارد.

جدول ۸. مصرف کل انرژی نهایی و توان اوج خانه کبیری:

سناریو	مصرف کل انرژی نهایی (kWh/m².year)	توان اوج گرمایش(W/m²)	توان اوج سرمایش(W/m²)
S0 – موجود	۱۲۰/۰	۷۰/۰	۲۷/۵
S1	۱۱۰/۰	۶۵/۰	۲۲/۵
S2	۱۱۴/۰	۶۷/۰	۲۴/۵
S3	۱۰۸/۰	۶۳/۰	۲۵/۵
S4	۹۵/۰	۶۰/۰	۲۰/۵

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

- مصرف کل انرژی نهایی در سناریوی S4 حدود ٪۲۱ نسبت به حالت موجود کاهش یافته است؛ این میزان برای یک ساختمان تاریخی بدون تغییر فرم اصلی پوسته، رقم قابل توجهی است.
- کاهش توان اوج گرمایش از W/m^2 ۷۰/۰ به W/m^2 ۶۰/۰ در سناریوی S4 ، به این معناست که می‌توان در طراحی سیستم تأسیسات مکانیکی (بویلر/رادیاتور/پکیج) از تجهیزات با ظرفیت پایین‌تر و هزینه اولیه کمتر استفاده کرد.

جدول ۹. مصرف کل انرژی نهایی و توان اوج خانه یوسفی:

سناریو	مصرف کل انرژی نهایی($kWh/m^2.year$)	توان اوج گرمایش(W/m^2)	توان اوج سرمایش(W/m^2)
S0-موجود	۱۶۰/۰	۸۵/۰	۳۵/۰
S1	۱۵۱/۰	۸۱/۰	۳۰/۰
S2	۱۵۴/۰	۸۲/۰	۳۱/۰
S3	۱۴۷/۰	۷۸/۰	۳۲/۰
S4	۱۳۶/۰	۷۲/۰	۲۶/۰

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

- مصرف کل انرژی نهایی در سناریوی S4 حدود ٪۱۵ نسبت به حالت موجود کاهش‌یافته است؛ این میزان برای یک ساختمان تاریخی بدون تغییر فرم اصلی پوسته، رقم قابل‌توجهی است (مطابق مطالعات Tabriz قاجاری،$kWh/m^2.year$ ۱۲۰-۱۶۰ پایه.)
- کاهش توان اوج گرمایش در چارچوب شبیه‌سازی انجام شده از W/m^2 ۸۵/۰ به W/m^2 ۷۲/۰ در سناریوی S4 کاهش یافت، به این معناست که می‌توان در طراحی سیستم تأسیسات مکانیکی (بویلر/رادیاتور/پکیج) از تجهیزات با ظرفیت پایین‌تر و هزینه اولیه کمتر استفاده کرد.

٤-۸- آسایش حراتی و دمای داخلی خانه کبیری و یوسفی

(بر اساس مدل تطبیقی ASHRAE 55 – محدوده دمای آسایش ۲۰–۲۴°C زمستان، ۲۴–۲۷°C تابستان)

جدول ۱۰.درصد ساعات آسایش حرارتی

سناریو	درصد ساعات در محدوده آسایش در فضاهای نشیمن در خانه کبیری	درصد ساعات در محدوده آسایش در فضاهای نشیمن در خانه یوسفی
S0 – موجود	٪۶۷/۵	٪۶۰
S1	٪۷۵	٪۶۵
S2	٪۷۳	٪۶۴
S3	٪۷۷	٪۶۷
S4	٪۸۲/۵	٪۷۵

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

- نتایج نشان می‌دهد که اجرای سناریوی ترکیبی بیوفیلیک (S4) موجب افزایش ساعات آسایش حرارتی در چارچوب شبیه‌سازی انجام شده از ٪۶۰ به ٪۷۵ تغییریافته است؛ به بیان دیگر، در حدود ٪۱۵ از ساعات سال، شرایط حرارتی بدون نیاز به مصرف اضافی انرژی به محدوده آسایش نزدیک‌تر شده است.

- از منظر تجربه انسانی، این به معنای افزایش کیفیت زیست‌پذیری در حیاط و فضاهای پیرامونی نیز هست؛ یعنی آسایش فقط داخل بنا بهبود نیافته، بلکه فضای نیمه‌باز حیاط هم به فضایی قابل‌استفاده‌تر در فصول انتقالی (بهار/پاییز) تبدیل شده است.

- **تغییرات دمای داخلی در ماه‌های حساس بناها:**

به‌عنوان نمونه، متوسط دمای داخلی در اتاق نشیمن در دو ماه دی (سردترین ماه) و مرداد (گرم‌ترین ماه) بررسی شده است:

جدول ۱۱: متوسط دمای داخلی در اتاق نشیمن

سناریو	دی (میانگین دمای داخلی، °C) کبیری	مرداد (میانگین دمای داخلی، °C) کبیری	دی (میانگین دمای داخلی، °C) کبیری	مرداد (میانگین دمای داخلی، °C) یوسفی
S0	۱۷/۵	۲۸/۲	۱۶/۵	۲۹/۰
S1	۱۸/۶	۲۷/۳	۱۷/۲	۲۸/۳
S2	۱۹/۰	۲۶/۹	۱۷/۵	۲۸/۱
S3	۱۹/۵	۲۷/۱	۱۷/۸	۲۸/۴
S4	۲۰/۲	۲۶/۰	۱۸/۵	۲۷/۵

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل خانه کبیری:

- در حالت موجود، دمای متوسط°C ۱۷/۵ در دی، پایین‌تر از محدوده آسایش است و ساکن ناچار به استفاده مداوم از سیستم گرمایشی است. در سناریوی ترکیبی این دما به حدود°C ۲۰/۰ نزدیک می‌شود که با گرمایش کمکی محدود می‌تواند به آسایش کامل برسد.
- در مرداد، دما از حدود°C ۲۸/۲ به°C ۲۶/۰ کاهش می‌یابد؛ یعنی فضای داخلی حتی بدون کولر می‌تواند برای بخش عمده‌ای از ساعات روز قابل‌تحمل‌تر شود.

تحلیل خانه یوسفی:

- در حالت موجود، دمای متوسط °C ۱۶/۵ در دی، پایین‌تر از محدوده آسایش است و ساکن ناچار به استفاده مداوم از سیستم گرمایشی (شومینه سنتی + گازی) است. در سناریوی ترکیبی این دما به حدود°C ۱۸/۵ نزدیک می‌شود که با گرمایش کمکی محدود می‌تواند به آسایش کامل برسد.
- در مرداد، دما از حدود°C ۲۹/۰ به°C ۲۷/۵ کاهش می‌یابد؛ یعنی فضای داخلی حتی بدون کولر می‌تواند برای بخش عمده‌ای از ساعات روز قابل‌تحمل‌تر شود.

٤-۹- روش تحلیل داده های پرسش نامه

به‌منظور سنجش ادراک پاسخ‌دهندگان از کیفیت فضایی، عناصر بیوفیلیک و قابلیت‌های محیطی بافت تاریخی، داده‌های پرسش‌نامه با نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. پس از کدگذاری پاسخ‌ها بر اساس مقیاس لیکرت پنج‌درجه‌ای، متغیرها در چهار مقیاس موضوعی(BIO ، SOC، SQ)و دو متغیر مستقل ارزیابی کلی (OV1 و OV2) سامان‌دهی شدند.

جدول ۱۲: خلاصه نتایج پایایی مقیاس‌های پرسش نامه

نام مقیاس	تعداد گویه‌ها	مقدار آلفای کرونباخ(α)	وضعیت پایایی
ادراک بیوفیلیک(BIO1–BIO5)	۵	در مقیاس ادغام‌شده لحاظ شده	پایایی تأییدشده
کیفیت اجتماعی - فضایی(SOC1–SOC5)	۵	در مقیاس ادغام‌شده لحاظ شده	پایایی تأییدشده
کیفیت فضایی - کارکردی(SQ1–SQ5)	۵	در مقیاس ادغام‌شده لحاظ شده	پایایی تأییدشده
مقیاس ادغام‌شدهBIO+SOC+SQ	۱۵	/۸۷۶	بسیار خوب - قابل‌اعتماد
ارزیابی کلی فضا(OV1–OV2)	۲	قابل‌محاسبه نیست	استفاده به‌صورت شاخص منفرد

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

- **تحلیل تطبیقی سناریوها در دو بنای تاریخی: خانه کبیری و خانه یوسفی**

این تحلیل بر اساس نتایج شبیه‌سازی EnergyPlus در DesignBuilder انجام شده و سناریوهای بیوفیلیک (S0 تا S4) را در دوخانه تاریخی خوی مقایسه می‌کند. هدف، ارزیابی صرفه‌جویی انرژی، افزایش آسایش حرارتی و سازگاری با اقلیم سرد خوی است.

۱. مقایسه عملکرد پایه (سناریو S0: وضعیت موجود)

خانه کبیری از ابتدا کارآمدتر است، زیرا پوسته حرارتی بهتری دارد (دیوارهای آجری با ۰/۷۵U-value در مقابل ۰/۹۰ در یوسفی؛ سقف کاهگلی با ۰/۳۸λ در مقابل ۰/۴۸ در یوسفی). این تفاوت منجر به مصرف انرژی پایین‌تر و آسایش بیشتر می‌شود:

- بار گرمایش: ۱۰۲/۵ kWh/m².year (کبیری) vs. ۱۴۰/۰kWh/m².year (یوسفی)
- بار سرمایش: ۱۰/۰ kWh/m².year (کبیری) vs. ۱۵/۰kWh/m².year (یوسفی)
- مصرف کل انرژی نهایی(EUI): ۱۲۰/۰kWh/m².year (کبیری) vs. ۱۶۰/۰ kWh/m².year (یوسفی)
- درصد ساعات آسایش حرارتی: ۶۷٪/۵ (کبیری) vs. ۶۰٪ (یوسفی)

این عملکرد پایه بهتر در کبیری، آن را به نقطه شروع ایده‌آلی برای مداخلات بیوفیلیک تبدیل می‌کند.

مقایسه سناریوها شامل S1 (احیای حیاط گیاهی)، S2 (دیوار سبز داخلی)، S3 (بام سبز نیمه سبک) و S4 (ترکیبی) هستند. جدول زیر تغییرات کلیدی را نشان می‌دهد (درصد کاهش نسبت به S0):

جدول ۱۳: مقایسه نتایج سناریوها

سناریو	بار گرمایش (کاهش ٪)	بار سرمایش (کاهش ٪)	مصرف کل انرژی (کاهش ٪)	ساعات آسایش (افزایش واحد)
S1	یوسفی: ٪۵ کبیری: ٪۶/۳	یوسفی: ٪۲۰ کبیری: ٪۳۰	یوسفی: ≈٪۵/۶ کبیری: ≈٪۸/۳	یوسفی: ۵+ کبیری: ۷/۵+
S2	یوسفی: ٪۳/۶ کبیری: ٪۴/۴	یوسفی: ٪۱۶/۷ کبیری: ٪۲۰	یوسفی: ≈٪۳/۷ کبیری: ≈٪۵	یوسفی: ۴+ کبیری: ۵/۵+
S3	یوسفی: ٪۸/۶ کبیری: ٪۱۰/۲	یوسفی: ٪۱۰ کبیری: ٪۱۰	یوسفی: ≈٪۸/۱ کبیری: ≈٪۱۰	یوسفی: ۷+ کبیری: ۹/۵+
S4	یوسفی: ٪۱۵/۷ کبیری: ٪۲۰	یوسفی: ٪۳۳/۳ کبیری: ٪۴۵	یوسفی: ≈٪۱۵ کبیری: ≈٪۲۱	یوسفی: ۱۵+ کبیری: ۱۵+

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

در همه سناریوها، خانه کبیری کاهش درصدی بیشتری نشان می‌دهد، به‌ویژه در S4 که مصرف کل انرژی به ۹۵ kWh/m².year (کبیری) vs. ۱۳۶kWh/m².year (یوسفی) می‌رسد.

تحلیل اثر سناریوها موارد ذیل را در بردارد:

- سناریوهای سبک (S1 و S2): تمرکز روی حیاط و دیوار سبز، بیشترین تأثیر را روی سرمایش تابستانی دارد (رطوبت و سایه). خانه کبیری بهتر عمل می‌کند، زیرا موقعیت سه‌نبش و حیاط باغچه‌ای موجود، تبخیر - تعرق مؤثرتری ایجاد می‌کند. این سناریوها کم‌هزینه و سازگار با محدودیت‌های میراثی هستند.
- سناریو افقی (S3): بام سبز عایق اضافی فراهم می‌کند و بیشترین کاهش گرمایش را در اقلیم سرد خوی ایجاد می‌کند. اثر آن در کبیری قوی‌تر است، زیرا سقف کاهگلی پایه بهتری برای لایه سبز دارد.
- سناریو ترکیبی (S4): بهترین گزینه کلی، با هم‌افزایی مداخلات. خانه کبیری به سطح آسایش بالاتری (۸۲٪/۵ vs. ۷۵٪) می رسد و صرفه‌جویی بیشتری (۲۱٪ vs. ۱۵٪ در EUI) ارائه می‌دهد، بدون تغییر عمده پوسته.

دلایل تفاوت عملکرد شامل موارد زیر است:

- کیفیت پوسته پایه: عایق‌بندی بهتر کبیری (U-value و λ پایین‌تر) مداخلات را تقویت می‌کند و هم‌افزایی بیشتری ایجاد می نماید.
- ویژگی‌های کالبدی: حیاط نیمه فرورفته و موقعیت سه‌نبش کبیری، جریان هوا و سبزسازی را کارآمدتر می‌کند.
- چالش‌های اجرایی: هر دو محدودیت میراثی دارند (مانند خطر رطوبت در پوشش سنتی)، اما مرمت اخیر کبیری (۱۴۰۳) آن را آماده‌تر برای اجرا می‌سازد.
- روش کاربستی ANP در ارزیابی سناریوهای بیوفیلیک:

در این پژوهش، برای ارزیابی و رتبه‌بندی سناریوهای مداخله بیوفیلیک در دو بنای تاریخی خانه کبیری و خانه یوسفی، از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) استفاده شد. در این راستا، داده‌های مربوط به خوشه انرژی از شبیه‌سازی EnergyPlus در محیط DesignBuilder استخراج شده و پس از نرمال‌سازی با روش Min–Max، به‌منظور ورود به مدل تصمیم‌گیری مورداستفاده قرار گرفتند. ساختار تصمیم‌گیری در نرم‌افزار Super Decisions پیاده‌سازی شد و سوپرماتریس‌های اولیه، وزنی و حد محاسبه گردید.

این ۱۰ نفر همان گروه خبرگان مورداستفاده در مرحله اعتبارسنجی محتوایی ابزار بودند و نقش آنان در پژوهش، جدا از گروه کاربران پرسش‌نامه‌ای تعریف شد. نتایج حاصل از تحلیل در نرم‌افزار Super Decisions نشان داد که نسبت ناسازگاری (Consistency Ratio) برای تمامی ماتریس‌ها کمتر از ۰/۱ بوده که بیانگر سازگاری قابل قبول قضاوت‌های خبرگان و اعتبار نتایج تحلیل شبکه‌ای است.

انتخاب ANP به دلیل وجود وابستگی متقابل میان معیارها و محدودیت‌های میراثی، اجرایی و اقتصادی صورت گرفت. در هر دو بنا، چهار سناریوی مداخله شامل احیای حیاط با پوشش گیاهی بومی(S1) ، دیوار سبز داخلی(S2) ، بام سبز سبک/گسترده (S3) و سناریوی ترکیبی (S4) مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱۴. ساختار خوشه‌ها و شاخص‌های مدل ANP پژوهش

خوشه	زیربخش‌ها / شاخص‌ها
عملکرد انرژی و آسایش حرارتی	بار گرمایش(kWh/m².year) ، بار سرمایش(kWh/m².year) ، مصرف کل انرژی نهایی(EUI) ، درصد ساعات آسایش حرارتی
سازگاری با میراث تاریخی	حداقل مداخله و برگشت‌پذیری، عدم آسیب به مصالح اصیل، انطباق با ضوابط میراث‌فرهنگی
امکان‌پذیری اجرایی و ریسک	ریسک سازه‌ای، ریسک رطوبت و آسیب پوسته سنتی، پیچیدگی اجرا، نیاز به نگهداری
هزینه و منابع	هزینه اولیه اجرا، هزینه بهره‌برداری و نگهداری، مصرف آب و منابع
کیفیت فضایی و بیوفیلیک	کیفیت بصری و ادراکی، اثر سایه‌اندازی و تعدیل خرد اقلیم، افزایش قابلیت استفاده از فضاهای نیمه‌باز

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

وابستگی‌های درون خوشه‌ای و بین خوشه‌ای میان این معیارها در مدل لحاظ شد تا ساختار تصمیم‌گیری به شرایط واقعی بناهای تاریخی نزدیک‌تر شود.

جدول ۱۵. امتیاز خوشه انرژی در خانه کبیری و خانه یوسفی

سناریو	خانه کبیری (٪)	خانه یوسفی (٪)
S1-حیاط سبز	۱۷/۲۰	۱۳/۰
S2-دیوار سبز	۴/۴۰	۴/۶۰
S3-بام سبز	۱۷/۱۰	۱۷/۴۰
S4-ترکیبی	۶۱/۴۰	۶۴/۹۰

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل:

در هر دو بنا، سناریوی ترکیبی (S4) بیشترین بهبود انرژی و آسایش حرارتی را ایجاد کرده است که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی مداخلات بیوفیلیک است.

- **وزن‌دهی خوشه‌ها بر اساس ویژگی بنا:**

به‌منظور واقع‌گرایانه کردن تصمیم‌گیری، وزن خوشه‌ها متناسب با شرایط هر بنا تعیین شد:

- خانه کبیری **:**تمرکز بیشتر بر کاهش مصرف انرژی
- خانه یوسفی **:**تأکید بر حفاظت میراث و حداقل مداخله کالبدی

این تفاوت باعث شد نتایج نهایی با منطق معماری و حفاظتی هر بنا هم‌خوان باشد.

- **نتایج نهایی ANP و رتبه‌بندی سناریوها**

جدول ۱۶. وزن نهایی سناریوها در خانه کبیری

رتبه	سناریو	وزن نهایی خانه کبیری	درصد خانه کبیری	وزن نهایی خانه یوسفی	درصد خانه یوسفی
1	S4- ترکیبی	۰/۴۲۳	۴۲٪/۳۰	۰/۳۰۹	۳۰٪/۹
2	S1-حیاط سبز	۰/۲۵۸	۲۵٪/۸۰	۰/۲۹۱	۲۹٪/۱
3	S3-بام سبز	۰/۱۷۷	۱۷٪/۷۰	۰/۲۱۴	۲۱٪/۴
4	S2-دیوار سبز	۰/۱۴۱	۱۴٪/۱۰	۰/۱۸۷	۱۸٪/۷

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

- **تحلیل تطبیقی انرژی و تصمیم نهایی ANP**

جدول ۱۷. مقایسه رتبه انرژی و رتبه نهایی ANP

سناریو	رتبه انرژی	رتبه نهایی کبیری	رتبه نهایی یوسفی	تفسیر
S4	۱	۱	۱	بهترین عملکرد انرژی و بالاترین امتیاز نهایی در هر دو بنا
S1	۳	۲	۱	کم‌مداخله‌تر و سازگارتر با ملاحظات میراثی
S3	۲	۳	۴	مؤثر از نظر حرارتی، اما نیازمند بررسی سازه و رطوبت
S2	۴	۴	۳	اثر محدودتر نسبت به سایر سناریوها

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

تحلیل

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که سناریوی ترکیبی (S4) از نظر کاهش مصرف انرژی، افزایش آسایش حرارتی و امتیاز نهایی ANP در هر دو بنای کبیری و یوسفی رتبه نخست را به دست آورده است. بااین‌حال، سناریوی احیای حیاط گیاهی (S1) به دلیل ماهیت کم‌مداخله‌تر، برگشت‌پذیری بیشتر و ریسک اجرایی کمتر، می‌تواند در بناهایی با محدودیت حفاظتی شدید به‌عنوان گزینه جایگزین یا مرحله نخست مداخله موردتوجه قرار گیرد، بنابراین؛ (S4) گزینه برتر نهایی پژوهش است، اما اجرای آن در بناهای تاریخی باید با ارزیابی دقیق سازه، رطوبت، هزینه و الزامات حفاظتی همراه باشد.

٤-۱۰- جمع بندی کلی بخش روش پژوهش

جدول ۱۸.خلاصه نتایج کلی بخش پژوهش

ردیف	بخش فصل	هدف	روش / ابزار	خروجی کلیدی
۱	رویکرد تحقیق	تعریف چارچوب پژوهش	رویکرد ترکیبی (Mixed-Methods)+عمل‌گرایانه	امکان تحلیل هم‌زمان کالبدی، انرژی، اجتماعی و تصمیم‌گیری
۲	تحلیل کیفی زمینه‌ای	شناخت بستر تاریخی و معماری	برداشت میدانی، تحلیل کالبدی - اقلیمی	استخراج سناریوهای بیوفیلیک S1–S4
۳	معرفی بناهای موردی	تعیین نمونه‌های نماینده	مطالعه دوخانه قاجاری (کبیری - یوسفی)	مدل واقعی مصالح، ضخامت دیوار، سقف، پنجره، نفوذ هوا
۴	تعیین سناریوهای بیوفیلیک	طراحی راهکارهای سازگار با میراث	حیاط سبز، دیوار سبز، بام سبز، سناریوی ترکیبی	چهار سناریو برای شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری
۵	شبیه‌سازی انرژی	تحلیل کمی عملکرد ساختمان	DesignBuilder + EnergyPlus	بار گرمایش - سرمایش، EUI، توان اوج، آسایش حرارتی
۶	ارزیابی آسایش حرارتی	سنجش وضعیت داخلی بناها	مدل تطبیقی(ASHRAE 55)	تغییرات دمای داخلی، درصد ساعات آسایش
۷	تحلیل آماری پرسش‌نامه	بررسی ادراک کاربران نسبت به فضا و بیوفیلیک	پرسش‌نامه لیکرت+SPSS	پایایی: α = ۰/۸۷۶، تحلیل توصیفی و ادراکی
۸	تصمیم‌گیری چندمعیارهANP	انتخاب سناریوی بهینه	Super Decisions + ماتریس‌های زوجی	سناریوی S4 به‌عنوان گزینه برتر
۹	ادغام نتایج	ترکیب لایه‌های مختلف تحلیل	تلفیق کیفی + کمی + آماری + ANP	نتیجه‌گیری جامع درباره مداخلات سبز در بناهای تاریخی
۱۰	جمع‌بندی نهایی	ارائه مدل روش‌شناسی پژوهش	—	چارچوبی قابل‌تکرار برای تحلیل بناهای تاریخی در اقلیم سرد

۵. بحث و یافته‌های تحقیق

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری مداخلات بیوفیلیک در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد خوی می‌تواند، در چارچوب شبیه‌سازی سناریو محور، به بهبود عملکرد انرژی و ارتقای آسایش حرارتی منجر شود. تحلیل دینامیک انرژی با استفاده از EnergyPlus در دوخانه تاریخی کبیری و یوسفی نشان داد که سناریوی ترکیبی S4، شامل حیاط گیاهی، دیوار سبز داخلی و بام سبز نیمه سبک، بیشترین اثربخشی را در کاهش بارهای انرژی و تعدیل شرایط حرارتی دارد.

در خانه کبیری، سناریوی S4 مصرف نهایی انرژی را از ۱۲۰ به حدود ۹۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال کاهش داد که معادل کاهش حدود ۲۱ درصدی است. همچنین، بار گرمایشی حدود ۲۰ درصد و بار سرمایشی حدود ۴۵ درصد کاهش یافت و

ساعات آسایش حرارتی از ۵/۶۷ درصد به ۵/۸۲ درصد افزایش پیدا کرد. باتوجه‌به پایین‌بودن مقدار مطلق بار سرمایشی در اقلیم سرد خوی، کاهش درصدی بار سرمایشی باید بااحتیاط و در کنار مقدار مطلق آن تفسیر شود. در خانه یوسفی نیز الگوی مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری که بار گرمایشی حدود ۱۵ درصد و بار سرمایشی حدود ۳۳ درصد کاهش یافت و توان اوج گرمایش از ۸۵ به ۷۲ وات بر مترمربع رسید. مقایسه دو بنا نشان می‌دهد که میزان اثربخشی مداخلات بیوفیلیک به ویژگی‌های کالبدی اولیه، از جمله ضخامت دیوارها، جرم حرارتی، کیفیت بازشوها و میزان نفوذپذیری هوا وابسته است.

هم‌خوانی نتایج با ادبیات‌پژوهش نیز قابل‌توجه است. مطالعات Movahed et al (2021) و Raji et al(2015) نقش بام سبز را در کاهش بار حرارتی و بهبود عملکرد پوسته ساختمان تأیید کرده‌اند. همچنین، پژوهش‌های Vijayaraghavan(2016) و Nitu et al (2022) نشان می‌دهند که سبزینگی عمودی و پوشش گیاهی می‌توانند از طریق سایه‌اندازی، کاهش دمای سطحی و تعدیل خرداقلیم، در کاهش بار سرمایشی مؤثر باشند. از سوی دیگر، Tekin and Aktog(2025) تأکید می‌کنند که اثربخشی راهکارهای بیوفیلیک در اقلیم‌های سرد زمانی افزایش می‌یابد که این مداخلات با الگوهای بومی و زمینه کالبدی ساختمان هماهنگ شوند؛ موضوعی که در خانه‌های تاریخی حیاط‌محور خوی نیز قابل مشاهده است.

از بعد ادراکی و فضایی، نتایج پرسش‌نامه نشان داد که حضور عناصر طبیعی، علاوه بر اثرات حرارتی و انرژی، می‌تواند کیفیت تجربه فضایی، حس تعلق و ادراک کاربران از آسایش محیطی را ارتقا دهد. این یافته با نتایج پژوهش‌های نادری و قبادی (۲۰۲۳) و مجتبوی و تفکری (۲۰۲۳) هم‌راستا است و نشان می‌دهد که معماری بیوفیلیک در بافت‌های تاریخی نباید صرفاً به‌عنوان سبزسازی کالبدی تفسیر شود، بلکه باید به‌عنوان رویکردی تلفیقی میان عملکرد انرژی، کیفیت محیطی و تجربه انسانی مورد توجه قرار گیرد.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که سناریوی ترکیبی S4 به دلیل اثر هم‌افزای حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز، عملکرد بهتری نسبت به مداخلات منفرد دارد. بااین‌حال، به دلیل ماهیت شبیه‌سازی، نبود داده‌های میدانی بلندمدت و عدم کالیبراسیون کامل مدل، نتایج پژوهش باید به‌عنوان تحلیل مقایسه‌ای میان سناریوها تفسیر شوند، نه پیش‌بینی قطعی عملکرد واقعی بنا. تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات نرخ نفوذ هوا، ضخامت لایه بام سبز و درصد پوشش گیاهی نیز نشان داد که روند کلی نتایج در برابر تغییرات پارامترهای اصلی پایدار است.

٦. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها

پژوهش حاضر نشان داد که ادغام اصول معماری بیوفیلیک با الگوهای سنتی و بومی خانه‌های تاریخی خوی می‌تواند، در چارچوب شبیه‌سازی سناریو محور، به کاهش مصرف انرژی و ارتقای آسایش حرارتی کمک کند. نتایج تحلیل EnergyPlus و بررسی کالبدی - اقلیمی دوخانه کبیری و یوسفی نشان داد که سناریوی ترکیبی S4، شامل حیاط گیاهی، دیوار سبز و بام سبز سبک/گسترده، بهترین عملکرد نسبی را در میان سناریوها داشته است. این سناریو از طریق افزایش مقاومت حرارتی پوسته، تعدیل خرد اقلیم، سایه‌اندازی و تقویت ارتباط کنترل‌شده با طبیعت، موجب کاهش بارهای انرژی و افزایش ساعات آسایش حرارتی شد.

از منظر اجرایی، سناریوی ترکیبی S4 در بناهایی مناسب‌تر است که از نظر ظرفیت سازه‌ای، وضعیت رطوبتی بنا، امکان کنترل نفوذ آب و برنامه نگهداری دوره‌ای محدودیت جدی نداشته باشند و اجرای مداخلات با الزامات حفاظتی سازگار باشد. در مقابل، در بناهای دارای حساسیت میراثی بیشتر، محدودیت سازه‌ای یا امکان مداخله کمتر، سناریوی S1 به‌عنوان گزینه کم‌ریسک‌تر و سازگارتر با حفاظت در اولویت قرار می‌گیرد. پیش از اجرای دیوار سبز و بام سبز نیز ارزیابی ظرفیت باربری سازه، خطر نفوذ و تجمع رطوبت، عملکرد زهکشی، سازگاری گونه‌های گیاهی و الزامات نگهداری ضروری است.

از نظر نظری، این پژوهش به خلأ موجود درباره کاربرد مداخلات بیوفیلیک در بافت‌های تاریخی اقلیم سرد پاسخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب عناصر بیوفیلیک با الگوهای بومی مانند حیاط مرکزی، فرم درون‌گرا، دیوارهای ضخیم و اصل آب، سایه و گیاه می‌تواند به‌عنوان راهبردی کم مداخله برای بهبود کیفیت فضایی و کاهش اتلاف انرژی مورداستفاده قرار گیرد. این برداشت با دیدگاه‌هایی که معماری بیوفیلیک را فراتر از سبزسازی کالبدی و در پیوند باکیفیت محیطی، تجربه انسانی و ارتقای خرد اقلیم

می‌دانند، هم‌راستا است (Kellert, 2016; Reeve et al., 2015; Africa et al., 2019; Beatley & Newman, 2013).

باوجوداین، اجرای مداخلات بیوفیلیک در بناهای تاریخی نیازمند توجه به محدودیت‌های میراث‌فرهنگی، هزینه‌های اولیه، ظرفیت سازه‌ای، زهکشی، نگهداری، انتخاب گونه‌های گیاهی مقاوم به سرما و پذیرش اجتماعی است. مطالعات (Littke 2016 و Shrestha & Bajracharya 2022) نیز بر اهمیت ملاحظات اجرایی و نهادی در موفقیت راهکارهای طبیعت‌محور تأکید کرده‌اند، بنابراین؛ اجرای پروژه‌های پایلوت، هماهنگی میان شهرداری و میراث‌فرهنگی، و مشارکت ساکنان می‌تواند زمینه عملیاتی‌سازی این راهبردها را فراهم کند.

- **محدودیت‌های پژوهش**

مهم‌ترین محدودیت‌های این تحقیق شامل موارد زیر است:

- عدم وجود داده‌های اندازه‌گیری میدانی برای کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی
- ساده‌سازی برخی پارامترهای فیزیکی و گیاهی در مدل‌سازی
- محدودیت در دسترسی به اطلاعات دقیق عملکرد واقعی بناهای تاریخی
- وابستگی نتایج به فرضیات استانداردسازی‌شده در نرم‌افزار شبیه‌سازی

بنابراین، تعمیم نتایج این پژوهش باید بااحتیاط انجام شود. یافته‌ها بیش از همه برای خانه‌های تاریخی حیاط محور در اقلیم‌های سرد و نیمه‌خشک، با مصالح سنگین، بازشوهای محدود و محدودیت‌های حفاظتی مشابه قابل‌استفاده هستند. تعمیم مستقیم نتایج به سایر اقلیم‌ها، بناهای تاریخی فاقد حیاط مرکزی، ساختمان‌های دارای پوسته متفاوت یا بافت‌هایی با شرایط رطوبتی و سازه‌ای متفاوت، نیازمند شبیه‌سازی مستقل، پایش میدانی و کالیبراسیون مدل است. ازاین‌رو، نتایج پژوهش حاضر بیشتر به‌عنوان چارچوب مقایسه‌ای برای انتخاب سناریوی مناسب تفسیر می‌شود، نه نسخه قطعی برای همه بناهای تاریخی اقلیم سرد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، ملاحظات حفاظتی و ارزیابی چندمعیاره، پیشنهادها در سه سطح اولویت ارائه می‌شوند:

۱. مداخلات کم‌خطر و برگشت‌پذیر مانند حیاط گیاهی؛
۲. اجرای پایلوت دیوار سبز و بام سبز پس از بررسی رطوبت، زهکشی و ظرفیت سازه‌ای
۳. تدوین دستورالعمل اجرایی و تعمیم تدریجی راهکارها به سایر خانه‌های تاریخی مشابه پس از پایش میدانی.

٦-١- پیشنهاد کاربردی برای مدیران شهری و میراث فرهنگی

جدول ۱۹.پیشنهادات پژوهش

عنوان پیشنهاد	شرح / محتوای پیشنهادی	هدف و پیامد
تدوین دستورالعمل بیوفیلیک در بافت تاریخی	تهیه ضوابط فنی بام سبز، دیوار سبز و حیاط گیاهی؛ انتخاب گونه‌های مقاوم؛ مدیریت رطوبت؛ چارچوب‌های میراثی	اجرای ایمن، استاندارد و سازگار با بناهای تاریخی
اجرای پروژه‌های پایلوت در خانه‌های تاریخی خوی	اجرای آزمایشی بام سبز و دیوار سبز؛ پایش رطوبت، دما و انرژی؛ بررسی مشکلات یخبندان	سنجش عملکرد واقعی و قابل‌اتکا در اقلیم بسیار سرد خوی
بومی‌سازی گونه‌های گیاهی	استفاده از Festuca ، Buxus، Vinca، Berberis و گونه‌های بومی مقاوم	افزایش دوام گیاهان و جلوگیری از آسیب به سازه
بازنگری تأسیسات پس از اجرای بیوفیلیک	کاهش ظرفیت بویلر، استفاده از سیستم‌های کم‌مصرف، تنظیم مجددHVAC	کاهش هزینه‌های اولیه و مصرف سوخت
ایجاد مشوق‌های اقتصادی	وام کم‌بهره، یارانه خاک سبک و بستر کشت، تخفیف‌های مالیاتی	افزایش مشارکت و کاهش هزینه اجرای پروژه
آموزش و فرهنگ‌سازی	کارگاه‌های آموزشی برای معماران و ساکنان؛ نمایش نمونه‌های موفق	افزایش‌پذیرش اجتماعی در بافت تاریخی
توسعه پژوهش‌های آینده	تحلیل بلندمدت، مدل‌سازی رطوبتی، LCC، مطالعات تطبیقی	ارتقای ادبیات علمی و ارائه مدل قابل‌تکرار

گسترش مداخلات در مقیاس محله	شبکه‌سازی حیاط‌های سبز، بام‌های سبز پیوسته، تحلیل اقلیم خرد	بهبود تهویه طبیعی، کاهش جزیره حرارتی و افزایش زیست‌پذیری

منبع: گردآوری شده توسط نویسندگان، ۱۴۰۴

بر اساس نتایج شبیه‌سازی انرژی و ارزیابی چندمعیارهANP ، سناریوی ترکیبی (S4) در هر دو بنای کبیری و یوسفی بهترین عملکرد نهایی را نشان داد. بااین‌حال، در بناهایی با محدودیت‌های حفاظتی شدید، سناریوی حیاط گیاهی (S1) می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای کم‌مداخله‌تر و مرحله نخست مداخله موردتوجه قرار گیرد، بنابراین؛ پیشنهادهای اجرایی پژوهش باید باتوجه‌به میزان حساسیت میراثی، ظرفیت سازه‌ای، کنترل رطوبت، هزینه اجرا و امکان نگهداری انتخاب شوند.

در سطح اجرایی، پیشنهاد می‌شود مداخلات بیوفیلیک ابتدا در قالب پروژه‌های پایلوت و قابل‌بازگشت اجرا شوند و عملکرد حرارتی، رطوبتی و نیازهای نگهداری آن‌ها در یک دوره زمانی مناسب پایش شود. هماهنگی میان مدیریت شهری، میراث فرهنگی، متخصصان سازه و تأسیسات و بهره‌برداران بنا نیز برای کاهش ریسک‌های اجرایی ضروری است. پس از ارزیابی نتایج پایش و تأیید عملکرد فنی مداخلات، می‌توان راهکارهای موفق را به‌صورت تدریجی به سایر خانه‌های تاریخی با شرایط کالبدی و اقلیمی مشابه تعمیم داد.

در نهایت، پژوهش نشان می‌دهد که بافت تاریخی خوی نه‌تنها میراثی ارزشمند، بلکه بستری برای شهرنشینی پایدار و کم‌کربن است. اجرای اصول بیوفیلیک علمی و بومی‌سازی شده می‌تواند بناهای تاریخی را ضمن حفظ اصالت، به فضاهایی با کارایی انرژی بالا و کیفیت محیطی مطلوب تبدیل کند و الگویی نو برای بازآفرینی بافت‌های تاریخی سردسیر ایران ارائه دهد.

ملاحظات اخلاقی: این پژوهش با رعایت اصول اخلاق‌پژوهش انجام شده و رضایت آگاهانه پاسخ‌دهندگان اخذ گردیده است. اطلاعات به‌صورت محرمانه و ناشناس جمع‌آوری و صرفاً برای اهداف علمی پژوهش استفاده شده است.

پیروی از اصول اخلاق‌پژوهش: در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت‌نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

حامی مالی: ندارد

تعارض منافع: بنا بر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

Africa, J., Heerwagen, J., Loftness, V., & Ryan Balagtas, C. (2019). Biophilic design and climate change: performance parameters for health. *Frontiers in Built Environment*, *5*, 28. https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00028

Beatley, T. (2016). *Handbook of biophilic city planning & design*. Island Press.

Beatley, T., & Newman, P. (2013). Biophilic cities are sustainable, resilient cities. *Sustainability*, *5*(8), 3328-3345. https://doi.org/10.3390/su5083328

Bitraf, Ehsan, Habib Farah, & Zabihi, Hossein. (2018). Localization of ecological and biophilic architecture principles in the design of residential complexes in Iran to improve their quality. [In Persian]

Browning, W. D., & Ryan, C. O. (2020). *Nature inside: a biophilic design guide*. Routledge.

Gillis, K., & Gatersleben, B. (2015). A review of psychological literature on the health and wellbeing benefits of biophilic design. *Buildings*, *5*(3), 948-963. https://doi.org/10.3390/buildings5030948

Kellert, S. (2016). Biophilic urbanism: the potential to transform. *Smart and Sustainable Built Environment*, *5*(1). https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2015-0035

Kellert, S. R. (1993). *The biological basis for human values of nature*. In S. R. Kellert & E. O. Wilson (Eds.) , The Biophilia Hypothesis (pp. 42–69). Island Press.

Kellert, S. R., Heerwagen, J., & Mador, M. (2011). *Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life*. John Wiley & Sons.

Littke, H. (2016). Becoming biophilic: challenges and opportunities for biophilic urbanism in urban planning policy. *Smart and Sustainable Built Environment*, *5*(1). https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2015-0036

Mahdavian, V., Parhiz, & Faryad. (2024). Reformulating the biophilic city model in Isfahan. Human Geography Research Quarterly, 56(2), 115–135. [In Persian]

Moghimishahri, Elham, & Vafamehr, Mohsen. (2024). Evaluation and ranking of biophilic design principles in residential architecture in Mashhad. [In Persian]

Mojtabavi, S. M., & Tafakkori. (2023). Investigating strategies for promoting health and well-being in housing design through direct experience of biophilic architectural elements. Rahpouyeh Architecture and Urban Planning, 2(1), 35–52. [In Persian]

Movahed, Y., Bakhtiari, A., Eslami, S., & Noorollahi, Y. (2021). Investigation of single-storey residential green roof contribution to buildings energy demand reduction in different climate zones of Iran. *International Journal of Green Energy*, *18*(1), 100–110. https://doi.org/10.1080/15435075.2020.1831509 [In Persian]

Naderi, Ghobadi, Parisa, Maleki, & Aida. (2023). An investigation of thermal comfort in the biophilic approach (Case study: Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz Islamic Art University). Journal of Urban Design Studies and Urban Research, 32(6), 1–10. [In Persian]

Naseri, Parmis, Jodeiri Abbasi, Shafie-Zadeh, Asadollah, Mahmoudi-Nejad, & Babazadeh Eskoei. (2024). Developing a neurobiological theoretical model of biophilic design in architecture for environmental energy conservation using content analysis. Sustainable Energy Systems Quarterly, 2(4), 405–420. [In Persian]

Nitu, M. A., Gocer, O., Wijesooriya, N., Vijapur, D., & Candido, C. (2022). A biophilic design approach for improved energy performance in retrofitting residential projects. *Sustainability*, *14*(7), 3776. https://doi.org/10.3390/su14073776

Raeisi, Davtalab, Ghasemi, & Norouzi. (2025). An analysis of the role of biophilic design in creating climate-responsive and culturally appropriate architecture in Iran. Bagh-e Nazar. [In Persian]

Ragab, A., & Abdelrady, A. (2020). Impact of green roofs on energy demand for cooling in Egyptian buildings. *Sustainability*, *12*(14), 5729. https://doi.org/10.3390/su12145729

Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 610-623. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011

Reeve, A. C., Desha, C., Hargreaves, D., & Hargroves, K. (2015). Biophilic urbanism: contributions to holistic urban greening for urban renewal. *Smart and sustainable built environment*, *4*(2), 215-233. https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2014-0057

Sara Gholami, Farzin Haghparast, & Javad Ahmadi. (2025). Investigation of strategies for retrofitting and reducing energy consumption in residential buildings in the cold climate of Iran (Case study: Tabriz). Green Architecture Journal, 11(46), 85–96. [In Persian]

Tekin, B. H., & Aktog, M. A. (2025). A conceptual framework for biophilic architectural design in cold climates: A meta-synthesis analysis. *Buildings*, *15*(21), 3825. https://doi.org/10.3390/buildings15213825

Ulrich, R. S. (1993). *Biophilia, biophobia, and natural landscapes*. In S. R. Kellert & E. O. Wilson (Eds.) , The Biophilia Hypothesis (pp. 73–137). Island Press.

Urban, C. H., & Roös, P. B. A Biophilic Pattern Language for Cities.

Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, *57*, 740-752. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119