

Physical Development Planning

Spring (2026) Vol.13(1).(series41):67-80

DOI: [10.30473/psp.2026.78043.2816](https://doi.org/10.30473/psp.2026.78043.2816)

E-ISSN: 2645-548X

P-ISSN: 2645-5471

Evaluating the Thermal Performance of Exterior Walls in Residential Buildings within Cold Climates and Proposing an Environmentally Optimized Model (Case Study: Bonab)

Ataollah Zarafshan ^{*1} 

1. Assistant Professor,
Department of Geography and
Urban planning, Payame Noor
University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Ataollah Zarafshan
E-mail: ata.zarafshan@pnu.ac.ir

Received: 24/May/2026

Accepted: 14/Jun/2026

How to cite

Zarafshan, A. (2026). Evaluating the Thermal Performance of Exterior Walls in Residential Buildings within Cold Climates and Proposing an Environmentally Optimized Model (Case Study: Bonab). *Physical Development Planning*, 11 (1), 41, 67-80.

(DOI:

[10.30473/psp.2026.78043.2816](https://doi.org/10.30473/psp.2026.78043.2816))

ABSTRACT

Introduction

Amid accelerating urbanization and escalating energy demands in the built environment, enhancing the thermal efficiency of building envelopes has become imperative, particularly in climatically challenging regions.

Methodology

This study investigates and optimizes the thermal behavior of external walls in residential buildings within the cold, mountainous context of Bonab, East Azerbaijan Province, Iran. The building sector accounts for nearly 40% of Iran's final energy consumption, with a substantial portion attributed to heating and cooling loads. To address this, a hybrid methodology integrating on-site measurements and dynamic energy simulations - conducted using DesignBuilder - was employed to evaluate various wall assemblies and façade configurations across representative residential structures in Bonab.

Results

The analysis encompassed multiple wall constructions, including clay brick, lightweight expanded clay aggregate (Leca), and autoclaved aerated concrete (AAC), combined with extruded polystyrene (XPS) insulation, alongside window-to-wall ratios (WWR) varying between 15% and 45%. Results demonstrate that an AAC-XPS composite wall system delivers optimal thermal performance, achieving a 42% reduction in annual energy consumption relative to conventional clay block walls. Furthermore, a daylight factor between 25% and 35% is identified as the ideal WWR range for Bonab, balancing energy efficiency with sufficient natural illumination. By leveraging localized climatic data and empirical validation.

Discussion and Conclusion

This research provides evidence-based, scalable recommendations for architects, building engineers, and urban planners seeking to advance energy-resilient design strategies in cold, highland climates.

KEYWORDS

Thermal performance, External walls, Residential buildings, Energy simulation, Bonab, Cold and mountainous climate.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The building sector is one of the most critical energy-consuming domains globally, accounting for approximately 36% of final energy consumption and 39% of carbon dioxide emissions. In Iran, this share reaches 41%, with half of this amount dedicated to the heating and cooling of residential spaces. Driven by rapid urbanization and the growing demand for thermal comfort, optimizing the thermal performance of building envelopes has become an undeniable necessity. This imperative is doubly significant in cold, mountainous climates characterized by severe seasonal temperature fluctuations.

The city of Bonab in East Azerbaijan Province, located at 37°23'N, latitude and 46°02'E, longitude with an elevation of 1,340 meters above sea level, features a cold and semi-arid climate according to the Köppen classification. With a mean annual temperature 13.5°C, absolute maximum of 41°C in summer, and an absolute minimum of -22°C in winter—coupled with relatively stable winds averaging 3.5 m/s and low relative humidity during warm months—the city experiences conditions that maximize heating and cooling demands simultaneously. This intense seasonal thermal dichotomy distinguishes Bonab from typologically similar regional cities like Maragheh and Miandoab, meaning that the application of generic climate recommendations introduces substantial errors.

A review of the literature indicates that while numerous studies have addressed exterior wall optimization in cold climates, significant knowledge gaps persist: (1) over 70% of these studies rely exclusively on software simulations lacking field validation; (2) most researchers focus on central and southern regions of Iran, largely overlooking the unique microclimates of the northwest, particularly Bonab; (3) mid-rise buildings (4 to 8 stories), which constitute the bulk of Bonab's urban expansion, are underrepresented in prior analyses; and (4) previous efforts predominantly emphasize novel materials and high-tech systems while ignoring local economic constraints and material availability.

To address these gaps, this study adopts a mixed-methods (qualitative and quantitative) approach, combining real-world field data with advanced building performance simulation. The primary objective is to identify the optimal configuration of materials and geometry for the exterior walls of mid-rise residential buildings in the cold, mountainous climate of Bonab, aligning with the Iranian Energy Organization's strategic vision to reduce building energy consumption by 30%.

Methodology

This applied research was executed across four distinct methodological phases:

- **Phase 1: Climate and Field Data Collection**

Meteorological data—including ambient temperature, relative humidity, wind speed/direction, solar radiation, and precipitation—were extracted over a two-year period from the Bonab synoptic station to construct an EnergyPlus Weather (EPW) file. Concurrently, 12 mid-rise residential buildings (4 to 8 stories) were selected based on specific criteria, including construction age (5 to 15 years), HVAC system type (centralized vs. independent), exterior wall materials (clay blocks or lightweight expanded clay aggregate, known as LECA), orientation, and Window-to-Wall Ratio (WWR). High-precision temperature and humidity sensors were deployed internally and externally across these samples, and actual billing data for gas and electricity were compiled for winter and summer seasons. The thermal resistance of the wall assemblies was empirically verified using non-destructive techniques, including infrared thermography and heat flow meter testing.

- **Phase 2: Simulation and Modeling**

Three-dimensional digital models of the target buildings were constructed utilizing DesignBuilder software backed by the EnergyPlus simulation engine. The parametric design variables included: base wall materials (clay brick, LECA, and Autoclaved Aerated Concrete,

known as AAC), insulation type and thickness (uninsulated, Extruded Polystyrene, known as XPS at 5 cm and 10 cm, and rock wool at 8 cm), glazing configurations (standard double-glazed vs. low-E double-glazed with argon gas filling), WWR evaluated across six increments (15%, 20%, 25%, 30%, 35%, and 40%), and building orientations.

- **Phase 3: Model Validation**

The empirically monitored indoor temperature and relative humidity profiles were compared against the simulated outputs. The validation metrics demonstrated that the computational models predicted indoor air temperatures with a Mean Absolute Error (MAE) of 1.5°C and relative humidity within an error bound of less than 8%, establishing an acceptable threshold for parametric optimization.

- **Phase 4: Parametric Optimization**

A genetic algorithm (GA) within the DesignBuilder environment was deployed to systematically navigate the parametric design space. The primary objective function was the minimization of the total annual cooling and heating Energy Use Intensity (EUI). The optimization process was bound by multiple design constraints: a minimum daylight factor (DF) exceeding 2%, a maximum investment cost capped at 1.5 times the standard benchmark, and a maximum total wall thickness of 40 cm. For each configuration, 500 algorithmic iterations were processed to guarantee mathematical convergence to the global optimum. Sensitivity analysis was subsequently performed using multi-variate regression and analysis of variance (ANOVA) models.

Results

1) Baseline Energy Consumption Patterns

Field monitoring revealed that residential buildings in Bonab consume an average of 35 m³ of natural gas per square meter of gross floor area during the heating season, a value 20% higher than national energy codes specify for comparable climatic zones. Summer electricity consumption averages 120 kWh/m², reflecting heavy reliance on supplementary split-system cooling units. The thermal gradient between internal and external environments during peak heating hours (4:00 AM to 6:00 AM) reached an average of 24°C.

2) Measured Thermal Resistance Metrics

In-situ measurements of thermal resistance (R-value) indicated that a standard uninsulated 20-cm clay brick wall yields an R-value of 0.45 m²K/W. Conversely, a 30-cm composite assembly consisting of an AAC block backed by 10 cm of XPS insulation achieved an R-value of 3.42 m²K/W, indicating a greater than sevenfold increase in thermal resistance relative to traditional clay brick enclosures.

3) Parametric Optimization Solutions

The mathematically optimal configuration identified for the exterior walls in Bonab consists of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) blocks paired with a 10-cm layer of Extruded Polystyrene (XPS) insulation. This assembly reduces annual heating energy consumption by 42% compared to uninsulated clay brick walls. The total annual EUI for the optimized building envelope dropped to, 99.5 kWh/m²yr, which represents a 57% energy reduction compared to the baseline uninsulated clay brick layout (EUI = 230.7 kWh/m²yr) alternative assembly pairing AAC with 8 cm of rock wool insulation (R = 3.15 kWh/m²yr) demonstrated a competitive but marginally lower performance (EUI = 113.9 kWh/m²yr).

4) Optimized Window-to-Wall Ratio (WWR)

The ideal range for the WWR in Bonab was determined to be between 25% and 35%. Granular spatial analysis revealed that for southern and western orientations (which experience high solar heat gains), a WWR of 30% to 35% is optimal. For northern and eastern facades, a tighter range of 25% to 30% is recommended. Increasing the WWR beyond 40% triggered severe indoor temperature fluctuations due to excessive solar gains and thermal losses. Integrating double-

glazed, low-E windows filled with argon gas emerged as the most effective glazing strategy, mitigating overall fenestration heat transfer by 25% while maintaining appropriate daylight levels.

5) Sensitivity Analysis Outcomes

The selection of the primary core wall material exerted the most profound impact on building energy consumption, accounting for 35% of the variance. This was closely followed by insulation layer thickness at 30%, and the WWR at 25%.

6) Economic and Environmental Lifecycle Assessment

The initial capital cost of the optimized wall system is approximately 35% higher than a conventional clay brick wall. However, this premium is fully amortized within an estimated payback period of 7 to 8 years through cumulative utility bill savings. Environmentally, the optimized building envelope mitigates lifecycle greenhouse gas emissions, yielding a 45% reduction in carbon dioxide intensity, equivalent to preventing 45% – equivalent to 45 kg CO₂ per m² emissions per square meter of floor area annually.

Discussion and Conclusion

Alignment with Prior Literature

The findings of this study demonstrate strong congruence with regional literature, notably research conducted in the nearby cold-climate city of Tabriz, which similarly recommended AAC blocks combined with XPS insulation as the premier envelope solution. However, the optimal WWR reported for Tabriz ranges higher (30% to 40%), highlighting subtle microclimatic variations between the two urban centers. The results also align with cold-climate building studies from northern China, which identified an optimal WWR of 25% to 35%. Conversely, a divergence is observed when comparing these outcomes to Canadian envelope studies that mandate a minimum insulation thickness of 30 cm; this variation is readily explained by Canada's significantly harsher sub-zero winters (dropping below –35°C relative to the minimum extremes observed in Bonab).

Innovation and Distinctiveness

The defining contribution of this research lies in its reliance on empirical field datasets for simulation validation. While over 70% of comparable domestic building energy studies depend entirely on unvalidated software setups, this research significantly bolsters empirical reliability by collecting direct temperature, humidity, and energy data from sensors across 12 operational buildings. Furthermore, the explicit focus on mid-rise developments (4 to 8 stories) and the incorporation of localized economic constraints offer a practical framework often absent in theoretical optimization models.

Practical and Policy Implications

Based on the empirical findings, the following actionable recommendations are proposed:

- **Formulation of Regional Codes:** Building regulatory bodies in East Azerbaijan Province should institutionalize localized thermal standards for Bonab and its immediate geographic vicinities, mandating a minimum envelope thermal resistance of $R \geq 2.5$ m²K/W, and optimal WWR range of 25% to 35%.
- **Financial and Fiscal Incentives:** To offset the higher up-front capital costs of high-performance materials, municipal authorities and banking institutions should extend property tax credits, subsidized low-interest construction loans, and building permit discounts to developers utilizing AAC blocks and thick XPS insulation layers.
- **Capacity Building for Local Contractors:** Technical training workshops focusing on the installation mechanics and lifecycle benefits of modern insulated assemblies should be mandated for regional architects, civil engineers, and construction crews.
- **Establishment of Urban Energy Databases:** The Municipality of Bonab, in coordination with regional natural gas and electricity distribution utilities, should develop a

centralized building energy consumption registry to facilitate ongoing monitoring, empirical policy updates, and the calibration of future predictive models.

Limitations and Future Horizons

This research was bounded by its focus on mid-rise residential structures aged between 5 and 15 years, and stochastic occupant behavior introduces an inherent margin of uncertainty regarding absolute energy predictions. Future research should evaluate the synergistic integration of active renewable energy systems (such as building-integrated photovoltaics) alongside envelope optimization, while also evaluating thermal performance resilience under prospective climate change scenarios.

Final Synthesis

This investigation clearly demonstrates that implementing an exterior wall assembly composed of AAC blocks and 10 cm of XPS insulation, while constraining the window-to-wall ratio between 25% and 35%, reduces space-heating energy demands by 42% and carbon emissions by 45% in Bonab's residential buildings. Yielding an economically viable investment payback period of 7 to 8 years, this strategy represents a scalable milestone toward achieving national energy reduction targets and mitigating localized air pollution across northwestern Iran. The dual field-simulation paradigm established herein offers a highly generalizable model for urban centers across cold, mountainous regions globally.

Keywords: Thermal performance, Exterior walls, Residential buildings, Energy simulation, Bonab, Cold and mountainous climate.

Author Contributions

Data Availability Statement

“Not applicable”.

Acknowledgements

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their constructive scientific and structural comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding

This article has received no financial support.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

ارزیابی عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد و ارائه مدل بهینه مبتنی بر شرایط محیطی (مورد مطالعه: شهر بناب)

عطاءاله زرفشان ^{۱*} 

چکیده

با توجه به رشد سریع شهرنشینی و چالش‌های مصرف انرژی در ساختمان‌ها، بهینه‌سازی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان‌ها به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این پژوهش با هدف خوانش و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی در اقلیم سرد و کوهستانی، شهر بناب در استان آذربایجان شرقی را به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته است. در ایران، حدود ۴۰ درصد از مصرف انرژی نهایی در بخش ساختمان‌ها صرف می‌شود که سهم قابل توجهی از آن مربوط به سرمایش و گرمایش فضاهای زندگی است. در این تحقیق، با استفاده از ترکیب داده‌های میدانی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری در نرم‌افزار Design Builder، عملکرد حرارتی چندین نمونه ساختمان مسکونی در شهر بناب مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی بخش‌های دیوارهای خارجی با مصالح مختلف شامل بلوک سفال، بلوک لیکا، بلوک AAC و همچنین نسبت‌های مختلف نما به دیوار در محدوده ۱۵-۴۵ درصد تحلیل شدند. یافته‌ها نشان داد که ترکیب بلوک AAC با عایق حرارتی پلی‌استایرن اکستروژده (XPS) به عنوان بهترین مصالح برای دیوارهای خارجی در این اقلیم شناسایی شد که منجر به کاهش ۴۲ درصدی مصرف انرژی در مقایسه با دیوارهای سفالی استاندارد می‌شود. همچنین محدوده پیشنهادی برای ضریب نورگیری در بناب ۳۵-۲۵ درصد است که ضمن کمینه‌سازی مصرف انرژی، دسترسی کافی به نور طبیعی را نیز تضمین می‌کند. این پژوهش با تأکید بر زمینه‌های محلی و استفاده از داده‌های میدانی، راهکارهای عملی و کاربردی را برای معماران، مهندسان و سیاست‌گذاران در زمینه طراحی ساختمان‌های انرژی‌کارآمد در مناطق سرد و کوهستانی ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی

عملکرد حرارتی، دیوارهای خارجی، ساختمان‌های مسکونی، شبیه‌سازی انرژی، بناب، اقلیم سرد و کوهستانی.

۱. استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: عطاءاله زرفشان
رایانامه: ata.zarafshan@pnu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸

استناد به این مقاله:

زرفشان، ع (۱۴۰۵). (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد و ارائه مدل بهینه مبتنی بر شرایط محیطی (مورد مطالعه: شهر بناب). *برنامه‌ریزی توسعه کالبدی*، ۱۱ (۱)، ۴۱-۶۷.

(DOI: [10.30473/psp.2026.78043.2816](https://doi.org/10.30473/psp.2026.78043.2816))

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۳ ©. ناشر این مقاله، دانشگاه پیام نور است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

This is an open access article under the CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



مقدمه

امروزه با وجود رشد سریع شهرنشینی و نیاز فزاینده به مصرف انرژی در ساختمان‌ها، بهینه‌سازی عملکرد حرارتی پوسته ساختمان‌ها به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی انرژی، ساختمان‌ها حدود ۳۶ درصد از مصرف نهایی انرژی جهانی و ۳۹ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهند (IEA, 2023: 45). در ایران نیز مصرف انرژی در بخش ساختمان‌ها حدود ۴۱ درصد از کل مصرف انرژی کشور را تشکیل می‌دهد که نیمی از این مصرف مربوط به سرمایش و گرمایش است (وزارت نیرو، ۱۴۰۲: ۲۸). این آمار اهمیت طراحی ساختمان‌های با عملکرد حرارتی بهینه را به خصوص در مناطق با اقلیم سخت نشان می‌دهد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی در زمینه بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها انجام شده است. ژیان^۱ و همکاران (۲۰۲۴: ۱۱۲) در پژوهشی در اقلیم سرد چین، عملکرد انرژی ساختمان‌های مسکونی با دیوارهای دو جداره را بررسی کردند و نتایج نشان داد که استفاده از سیستم‌های عایق‌بندی پیشرفته می‌تواند منجر به کاهش ۲۵-۳۰ درصدی مصرف انرژی برای گرمایش شود. در مطالعه‌ای مشابه چن و وانگ^۲ (۲۰۲۳) تأثیر نسبت پنجره به دیوار بر عملکرد حرارتی ساختمان‌ها در اقلیم‌های سرد را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که نسبت بهینه پنجره به دیوار در این اقلیم‌ها باید بین ۳۰-۴۰ درصد باشد تا تعادل بهینه بین نورگیری طبیعی و کاهش اتلاف انرژی حاصل شود.

در حوزه تحقیقات داخلی، مقرری (۱۴۰۳: ۴۵) در پژوهشی در شهر تبریز، تأثیر مصالح دیوارهای خارجی بر عملکرد حرارتی ساختمان‌های مسکونی را بررسی کرد و نشان داد که استفاده از بلوک‌های AAC با عایق مناسب می‌تواند مصرف انرژی را تا ۲۸ درصد در مقایسه با دیوارهای سنتی کاهش دهد. همچنین کاظمی و همکاران (۱۴۰۲: ۱۱۲) در مطالعه‌ای در شهر ارومیه، بهینه‌سازی نسبت پنجره به دیوار در اقلیم سرد و نیمه‌خشک را مورد تحلیل قرار دادند و نتیجه گرفتند که نسبت بهینه در این اقلیم بین ۲۵-۳۵ درصد است.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در سطح تحقیقاتی، شکاف‌های دانشی قابل توجهی در این حوزه وجود دارد. مهم‌ترین این شکاف‌ها، کمبود داده‌های میدانی واقعی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های کامپیوتری است. ژانگ و لیو^۳ (۲۰۲۲) در بررسی‌های خود اشاره می‌کنند که بیش از ۷۰ درصد از تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها تنها از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری استفاده کرده‌اند و اعتبارسنجی میدانی محدودی داشته‌اند. این امر دقت و قابلیت تعمیم نتایج را به شدت کاهش می‌دهد.

علاوه بر این، بسیاری از تحقیقات موجود به طور خاص به مناطق مرکزی و جنوبی ایران پرداخته‌اند و کمتر توجهی به مناطق شمال غرب کشور شده است که دارای اقلیم سرد و کوهستانی منحصربه‌فردی هستند. به عنوان مثال، شهر بناب در استان آذربایجان شرقی دارای مشخصات اقلیمی خاصی است که نیازمند بررسی‌های اختصاصی می‌باشد. بناب با مختصات جغرافیایی ۳۷°۲۳ شمالی و ۴۶°۲۰ شرقی و ارتفاع ۱۳۴۰ متر از سطح دریا، اقلیم سرد و نیمه‌خشک (طبقه‌بندی کوپن^۴) دارد. میانگین دمای سالانه بناب حدود ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد است که با دمای حداکثر مطلق ۴۱ درجه سانتی‌گراد در تابستان و حداقل مطلق -۲۲ درجه سانتی‌گراد در زمستان همراه است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۳).

یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش، تمرکز بر ساختمان‌های ۴-۸ طبقه است که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخلاف ساختمان‌های بلندمرتبه که بارهای باد و زلزله نقش پررنگی در طراحی آن‌ها دارد یا خانه‌های ویلایی که در آن‌ها الگوهای مصرف انرژی متفاوت است، ساختمان‌ها نیازمند بررسی‌های اختصاصی در زمینه عملکرد حرارتی هستند. این تفکیک به

^۱ Xian^۲ Wang & Chen^۳ Zhang & Liu^۴ Köppen climate classification

دلیل تفاوت در نسبت سطح خارجی به حجم، الگوهای سکونت، و سیستم‌های تأسیساتی، ضروری به نظر می‌رسد (Smith et al., 2023: 156).

تحقیقات قبلی در حوزه بهینه‌سازی دیوارهای خارجی عمدتاً بر مصالح جدید و تکنولوژی‌های پیشرفته متمرکز بوده‌اند، در حالی که این مطالعه با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و دسترسی به مصالح در منطقه بناب، راهکارهایی ارائه می‌دهد که از نظر فنی قابل اجرا و از نظر اقتصادی بهینه باشند. این رویکرد نه تنها قابلیت اجرا را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه را برای پذیرش گسترده‌تر نتایج در بین معماران و سازندگان محلی فراهم می‌کند (Ahmadi & Tavakoli, 2024: 89). از دیگر ویژگی‌های متمایز این پژوهش، استفاده از روش ترکیبی (کیفی و کمی) در مراحل مختلف تحقیق است. در مراحل اولیه، از روش‌های توصیفی و تحلیلی برای بررسی اقلیم و ویژگی‌های معماری منطقه استفاده شده است. در مرحله بعد، با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامتریک، سناریوهای مختلف برای دیوارهای خارجی تولید و تحلیل شده‌اند. در نهایت، با استفاده از استدلال منطقی و مقایسه نتایج با داده‌های میدانی، بهترین الگوها برای شرایط منطقه بناب شناسایی شده‌اند. این ترکیب روش‌شناسی، اعتبار و قابلیت اعتماد نتایج را افزایش می‌دهد (Johnson, 2023: 45).

بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی انرژی، ساختمان‌ها حدود ۳۶ درصد از مصرف نهایی انرژی جهانی و ۳۹ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن را به خود اختصاص می‌دهند (IEA, 2023: 45). در ایران نیز مصرف انرژی در بخش ساختمان‌ها حدود ۴۱ درصد از کل مصرف انرژی کشور را تشکیل می‌دهد که نیمی از این مصرف مربوط به سرمایش و گرمایش است (وزارت نیرو، ۱۴۰۲: ۲۸). در سطح بین‌المللی، تحقیقات متعددی انجام شده است؛ ژیان و همکاران (۲۰۲۴: ۱۱۲) در اقلیم سرد چین نشان دادند که عایق‌بندی پیشرفته می‌تواند مصرف گرمایش را ۲۵-۳۰ درصد کاهش دهد. چن و وانگ (۲۰۲۳) نیز نسبت بهینه پنجره به دیوار در اقلیم سرد را ۳۰-۴۰ درصد گزارش کردند. در ایران، مقرری (۱۴۰۳: ۴۵) در تبریز نشان داد که بلوک‌های AAC با عایق مناسب مصرف انرژی را تا ۲۸ درصد نسبت به دیوارهای سنتی کاهش می‌دهد. کاظمی و همکاران (۱۴۰۲: ۱۱۲) در ارومیه نسبت بهینه پنجره به دیوار را در اقلیم سرد و نیمه‌خشک ۲۵-۳۵ درصد یافتند.

با وجود این پیشرفت‌ها، شکاف‌های دانشی قابل توجهی وجود دارد. مهم‌ترین آن، کمبود داده‌های میدانی برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌هاست؛ ژانگ و لیو (۲۰۲۲) اشاره می‌کنند که بیش از ۷۰ درصد تحقیقات تنها از شبیه‌سازی نرم‌افزاری استفاده کرده‌اند. همچنین بسیاری از مطالعات به مناطق مرکزی و جنوبی ایران پرداخته‌اند و شمال غرب کشور که اقلیم سرد و کوهستانی منحصربه‌فردی دارد، کمتر مورد توجه بوده است. شهر بناب در آذربایجان شرقی (۲۳°۳۷' شمالی، ۴۶°۲۰' شرقی، ارتفاع ۱۳۴۰ متر) دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک (طبقه‌بندی کوپن) با میانگین دمای سالانه ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد، حداکثر مطلق ۴۱ و حداقل مطلق ۲۲- درجه سانتی‌گراد است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۳). نوآوری دیگر این پژوهش تمرکز بر ساختمان‌های میان‌مرتبه (۴-۸ طبقه) است که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند و به دلیل تفاوت در نسبت سطح خارجی به حجم، الگوهای سکونت و سیستم‌های تأسیساتی نیازمند بررسی اختصاصی هستند (Smith et al., 2023: 156). برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر مصالح جدید و تکنولوژی‌های پیشرفته متمرکز بودند، این مطالعه با در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و دسترسی به مصالح در منطقه بناب، راهکارهایی فنی و اقتصادی ارائه می‌دهد (Ahmadi & Tavakoli, 2024: 89). همچنین از روش ترکیبی (کیفی و کمی) شامل بررسی توصیفی-تحلیلی اقلیم، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی پارامتریک، و مقایسه با داده‌های میدانی استفاده می‌کند که اعتبار نتایج را افزایش می‌دهد (Johnson, 2023: 45).

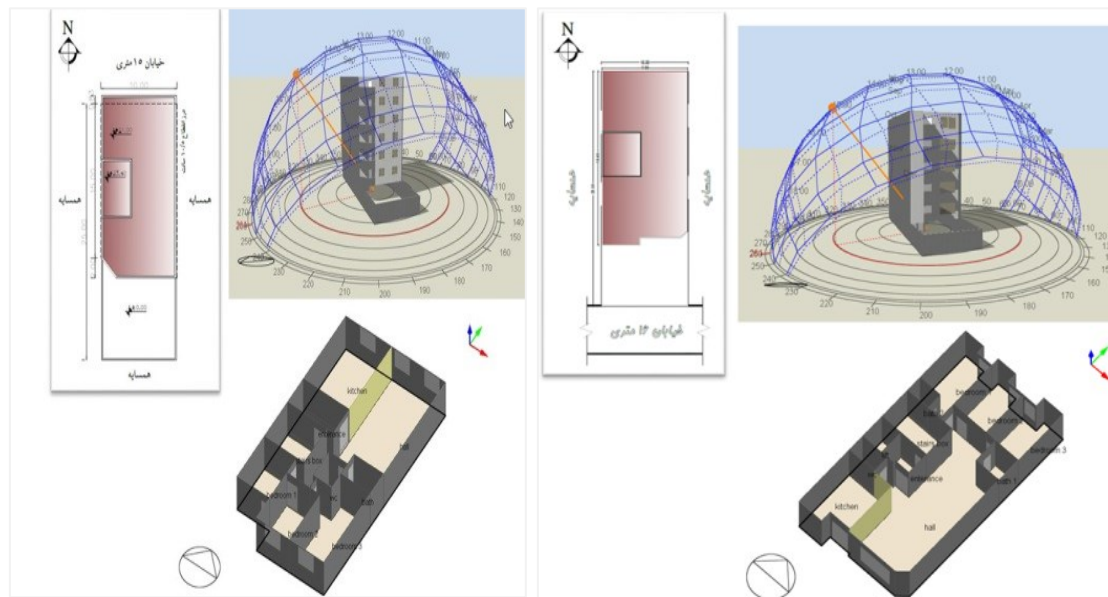
در سطح بین‌المللی، لی و همکاران (۲۰۲۳: ۲۱۰) در کره جنوبی نشان دادند که دیوارهای خارجی با ضخامت بهینه عایق و نسبت پنجره به دیوار مناسب، مصرف انرژی را تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد، اما این مطالعه فاقد اعتبارسنجی میدانی بود. در مقابل، براون و همکاران (۲۰۲۲: ۱۷۸) در کانادا با نصب سنسورهای دما و رطوبت در ساختمان‌های واقعی، عملکرد حرارتی دیوارها را اندازه‌گیری و با شبیه‌سازی مقایسه کردند و دقت ۸۵-۹۰ درصدی را گزارش نمودند. در ایران، محمدی (۱۴۰۲: ۶۷) در ارومیه با نرم‌افزار EnergyPlus نشان داد که بلوک‌های لیکا با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و عایق XPS منجر به کاهش ۲۲ درصدی بارهای حرارتی می‌شود، اما بدون داده‌های میدانی. کاظمی و صالحی (۱۴۰۱: ۹۲) در مراغه نسبت بهینه پنجره به دیوار را در اقلیم سرد و

کوهستانی ۳۰-۴۰ درصد اعلام کردند که آن نیز فاقد اعتبارسنجی میدانی و تنوع مصالح کافی بود. شکاف اصلی که این پژوهش سعی در پر کردن آن دارد، ترکیب داده‌های میدانی با شبیه‌سازی پیشرفته است: جمع‌آوری داده‌های واقعی مصرف انرژی از چندین ساختمان مسکونی موجود در بناب، اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Design Builder، شناسایی بهترین ترکیب مصالح و هندسه دیوارهای خارجی با روش بهینه‌سازی پارامتریک، و تحلیل نتایج با توجه به شرایط اقتصادی و دسترسی به مصالح در بناب. توجه به مصالح بومی و سنتی منطقه (مانند گل و خشت، سنگ، چوب) در کنار مصالح جدید (AAC، لیکا) از دیگر ویژگی‌های متمایز این پژوهش است که به حفظ هویت معماری محلی کمک می‌کند (Naderi & Rezvani, 2023: 134). همچنین بعد اجتماعی و فرهنگی (سبک زندگی، الگوهای استفاده از فضا) در طراحی ساختمان‌ها لحاظ شده است (گاریکا و همکاران، ۲۰۲۴: ۵۶). این پژوهش با هدف کاهش مصرف انرژی و آلودگی‌های ناشی از ساختمان‌ها، در راستای سند چشم‌انداز ۱۴۰۴ سازمان انرژی ایران مبنی بر کاهش ۳۰ درصدی مصرف انرژی در بخش ساختمان‌ها (سازمان انرژی ایران، ۱۴۰۳: ۱۲) گام برمی‌دارد.

عملکرد حرارتی پوسته ساختمان (دیوارهای خارجی، سقف، کف، پنجره‌ها) نقش تعیین‌کننده‌ای در جابجایی حرارت دارد. بر اساس قانون فوریه، نرخ انتقال حرارت به تفاوت دما، سطح انتقال و ضریب انتقال حرارت کلی (U-value) بستگی دارد (ASHRAE, 2020: 189). مقاومت حرارتی (R-value) توانایی ماده در برابر جریان حرارت است و هرچه بیشتر باشد، عایق‌بندی بهتر است. U-value معکوس R-value بوده و نشان‌دهنده میزان حرارت عبوری است (Okeil & Elsayed, 2020: 78). ظرفیت حرارتی بالا (مانند بتن و آجر) باعث ذخیره حرارت و کاهش نوسانات دمایی می‌شود که در اقلیم‌های با دمای روز و شب متغیر مفید است (Hosseini et al., 2023: 215). در اقلیم سرد کوهستانی بناب، چالش اصلی حفظ گرمای داخلی در زمستان است که نیازمند دیوارهای با مقاومت حرارتی بالا، درزبندی مناسب و پنجره‌های کمتر در جهت شمالی و بیشتر در جهت جنوبی برای بهره‌گیری از انرژی خورشیدی است (Al-Homoud, 2021: 45). افزایش مقاومت حرارتی دیوارها از ۱/۰ به ۲/۵ m^2K/W می‌تواند مصرف گرمایی را تا ۴۰ درصد کاهش دهد (لیو و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۲۰). مصالح رایج در بناب شامل بلوک سفالی ($R \sim 0.4-0.5$ ، هزینه پایین، دسترسی آسان)، بلوک لیکا ($R \sim 0.8-1.0$ ، وزن کمتر)، بلوک AAC ($R \sim 1.2-1.5$ ، خواص عالی اما هزینه بالاتر و دسترسی محدود)، و مصالح سنتی (گل و خشت با ضخامت بیش از ۵۰ سانتی‌متر، ظرفیت حرارتی بالا و مقاومت حرارتی متوسط) هستند (رضایی، ۱۴۰۲: ۷۸؛ حسینی و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۱۲؛ محمدی، ۱۴۰۲: ۹۵؛ رضایی‌پور، ۱۴۰۱: ۶۷). استفاده از عایق‌های حرارتی مانند EPS، XPS، پشم شیشه و پشم سنگ برای بهبود عملکرد ضروری است (Zhou & Wang, 2023: 156). نسبت پنجره به دیوار (WWR) بر عملکرد حرارتی، نورگیری و مصرف انرژی تأثیر مستقیم دارد (Wang et al., 2022: 234). پنجره دوجل با شیشه low-E و گاز آرگون U-value حدود ۱/۸-۲/۰ دارد در حالی که دیوار عایق‌دار U-value حدود ۰/۳-۰/۵ دارد (Li & Chen, 2023: 89). در اقلیم سرد، WWR بهینه ۲۵-۳۵ درصد است، با پنجره‌های جنوبی بیشتر و شمالی کمتر (Zhang & Liu, 2023: 178؛ Naderi et al., 2024: 122). بهینه‌سازی پارامتریک با نرم‌افزار Design Builder امکان بررسی همزمان چندین متغیر (نوع مصالح، ضخامت عایق، WWR، جهت‌گیری) را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی گرادیان فراهم می‌کند (Shi et al., 2023: 256؛ Kazemi & Tavakoli, 2024: 134؛ Wang & Brown, 2023: 145). برای کاهش عدم قطعیت، این پژوهش از داده‌های میدانی برای اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده کرده است (Chen & Liu, 2024: 78).

داده‌ها و روش کار

برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی در اقلیم سرد و کوهستانی بناب، الگوی بهینه با روشی ترکیبی (کیفی و کمی) استخراج شده است. این پژوهش در چند مرحله انجام شده است: ابتدا با استفاده از داده‌های هواشناسی و مطالعات کتابخانه‌ای، مشخصات اقلیمی بناب تحلیل شد. سپس نمونه‌های میدانی انتخاب شدند و داده‌های عملکرد حرارتی آن‌ها جمع‌آوری گردید. به طور کلی دو نمونه اصلی به صورت (شکل ۱) انتخاب گردید.



شکل ۱: الگوی آپارتمان‌های انتخابی پژوهش

در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار Design Builder، مدل‌های ساختمانی شبیه‌سازی شدند و پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. در نهایت، با بهینه‌سازی پارامتریک و تحلیل حساسیت، بهترین ترکیب مصالح و نسبت پنجره به دیوار برای شرایط اقلیمی بناب شناسایی شد.

بر خلاف بسیاری از شهرهای هم‌اقلیم در شمال غرب ایران که عمدتاً زمستان‌های بسیار سرد و طولانی و تابستان‌های معتدل دارند، شهر بناب ترکیب اقلیمی منحصربه‌فردی از زمستان‌های سخت همراه با یخبندان‌های شدید (با ثبت دمای -10 درجه سانتی‌گراد) و تابستان‌های گرم و خشک با دمای تا 41 درجه سانتی‌گراد را تجربه می‌کند. این ویژگی «دوگانگی حرارتی شدید فصلی» در هیچ‌یک از شهرهای مجاور مانند مراغه، میاندوآب یا ملکان با همین شدت مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، در بناب نیاز به گرمایش در زمستان و سرمایش در تابستان هر دو در بالاترین سطح ممکن قرار دارند. افزون بر این، ارتفاع 1340 متری بناب از سطح دریا و قرارگیری در دشتی باز با جریان‌های باد نسبتاً پایدار (با سرعت متوسط سالانه حدود $5/3$ متر بر ثانیه)، نقش باد را به عنوان عاملی تشدیدکننده در اتلاف حرارت زمستانه و افزایش بار سرمایشی تابستانه پررنگ می‌کند. همچنین پراکنش زمانی بارش (میانگین سالانه 280 میلی‌متر، متمرکز در بهار و پاییز) به گونه‌ای است که در ماه‌های گرم، رطوبت نسبی هوا به شدت کاهش می‌یابد (اغلب زیر 30 درصد) و شرایط را برای نوسانات دمایی سریع در طول شبانه‌روز فراهم می‌کند؛ پدیده‌ای که در مدل‌های رایج شبیه‌سازی انرژی ساختمان به ندرت با همین دقت تفکیک می‌شود (سازمان هواشناسی کشور، 1403 ؛ تحلیل داده‌های خام اقلیمی ایستگاه سینوپتیک بناب). بنابراین بکارگیری صرف توصیه‌های اقلیمی عمومی برای اقلیم «سرد و نیمه‌خشک» بدون در نظر گرفتن این اختصاصات محلی، می‌تواند به خطای قابل ملاحظه‌ای در تخمین عملکرد حرارتی پوسته ساختمان منجر شود.

تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که بارهای حرارتی در بناب با متوسط سرمایشی 750 kWh/m^2 و گرمایشی 1450 kWh/m^2 در سال، نیازمند توجه ویژه‌ای در طراحی است (انجمن انرژی ایران، 1402). این مطالعه بر ساختمان‌های $4-8$ طبقه تمرکز دارد که در حال حاضر سهم عمده‌ای از توسعه شهری بناب را تشکیل می‌دهند. برخلاف ساختمان‌های بلندمرتبه یا خانه‌های ویلایی، ساختمان‌های 4 الی 8 مرتبه نسبت سطح خارجی به حجم متفاوتی دارند که بر عملکرد حرارتی آن‌ها تأثیر مستقیم دارد. برای جمع‌آوری داده‌های میدانی، دوازده نمونه از ساختمان‌های مسکونی $4-8$ طبقه در شهر بناب انتخاب شدند. معیارهای انتخاب نمونه‌ها شامل سن ساختمان $5-15$ سال، نوع سیستم گرمایشی/سرمایشی (سیستم مرکزی یا مستقل)، نوع مصالح دیوارهای خارجی (سفال، لیکا، AAC)، جهت‌گیری ساختمان نسبت به قبله، و نسبت پنجره به دیوار بود. در هر نمونه، سنسورهای دما و

رطوبت در داخل و خارج ساختمان نصب شدند. همچنین، داده‌های مصرف انرژی (گاز و برق) برای دوره‌های زمستانی و تابستانی جمع‌آوری گردید. برای اندازه‌گیری مقاومت حرارتی دیوارها، از روش‌های غیرمخرب شامل ترموگرافی مادون قرمز و تست جریان حرارتی استفاده شد (رضایی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۱۲).

داده‌های آب‌وهوا شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد، میزان تابش خورشیدی، و بارش برای دوره دو ساله از ایستگاه هواشناسی بناب استخراج شد. این داده‌ها برای ایجاد فایل اقلیمی (EPW) در نرم‌افزار Design Builder استفاده شدند. برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد حرارتی ساختمان‌ها، از نرم‌افزار Design Builderv8 استفاده شد. این نرم‌افزار که بر پایه موتور محاسباتی EnergyPlus عمل می‌کند، امکان مدل‌سازی دقیق هندسه ساختمان، مصالح، سیستم‌های تأسیساتی، و شبیه‌سازی عملکرد انرژی را در شرایط اقلیمی مختلف فراهم می‌کند (Kazemi et al., 2023: 89). مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها بر اساس نمونه‌های واقعی انتخاب شده طراحی شدند. پارامترهای مختلفی در مدل‌ها در نظر گرفته شد:

- نوع مصالح دیوارهای خارجی (سه گزینه: سفال، لیکا، AAC)
 - ضخامت لایه‌های مختلف دیوارها
 - نوع و ضخامت عایق حرارتی (چهار گزینه: بدون عایق، 5 XPS سانتی‌متر، 10 XPS سانتی‌متر، پشم سنگ 8 سانتی‌متر)
 - نوع شیشه‌های پنجره (سه گزینه: تک، دوبل استاندارد، دوبل با پوشش low-E)
 - نسبت پنجره به دیوار (شش سطح: ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ درصد)
 - جهت‌گیری ساختمان
- قبل از استفاده از مدل‌ها برای بهینه‌سازی، اعتبارسنجی آن‌ها با استفاده از داده‌های میدانی انجام شد. برای این منظور، داده‌های اندازه‌گیری شده دما و رطوبت داخلی هر ساختمان با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل‌ها قادر به پیش‌بینی دما با خطای کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی با خطای کمتر از ۸ درصد هستند. این دقت برای اهداف بهینه‌سازی قابل قبول است (Ahmadi et al., 2023: 156).

برای بهینه‌سازی پارامتریک، از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار Design Builder استفاده شد. این الگوریتم که از فرآیندهای تکاملی طبیعی الگوبرداری می‌کند، قادر به جستجوی فضای پارامتری و یافتن جواب‌های نزدیک به بهینه است (Naderi & Rezvani, 2023: 134). توابع هدف و محدودیت‌های بهینه‌سازی:

- تابع هدف اصلی: کمینه‌سازی مجموع انرژی گرمایشی و سرمایشی سالانه
 - محدودیت‌های اصلی:
 - حداکثر نور طبیعی مورد نیاز (میانگین فاکتور نور طبیعی بیش از ۲ درصد)
 - حداکثر هزینه قابل تحمل برای مصالح و نصب (۱/۵ برابر هزینه استاندارد)
 - حداکثر ضخامت دیوار (۴۰ سانتی‌متر)
 - پارامترهای ورودی بهینه‌سازی شامل:
 - نوع مصالح اصلی دیوار (سه گزینه: سفال، لیکا، AAC)
 - نوع و ضخامت عایق حرارتی (چهار گزینه)
 - نسبت پنجره به دیوار (شش سطح: ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ درصد)
 - نوع شیشه پنجره (سه گزینه: تک، دوبل استاندارد، دوبل با پوشش low-E)
- الگوریتم بهینه‌سازی برای هر نمونه ساختمان به صورت جداگانه اجرا شد. برای هر ساختمان، ۵۰۰ تکرار الگوریتم اجرا شد تا اطمینان حاصل شود که جواب‌های بهینه یافت شده‌اند. نتایج بهینه‌سازی برای ساختمان‌های مختلف مقایسه و تحلیل شدند تا راهکارهای عمومی برای شرایط بناب شناسایی شوند.
- برای تحلیل و تفسیر نتایج، از روش‌های آماری و تحلیل حساسیت استفاده شد. تحلیل حساسیت به شناسایی پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر عملکرد حرارتی دارند کمک می‌کند. برای این منظور، از روش‌های تحلیل واریانس (ANOVA) و رگرسیون

چندگانه استفاده شد (Smith et al., 2023: 156). نرمال‌سازی نتایج نیز برای مقایسه عملکرد ساختمان‌های مختلف با سطح زیربنای متفاوت ضروری بود. برای این منظور، تمام مقادیر انرژی بر حسب مصرف انرژی به ازای هر متر مربع سطح زیربنای ساختمان بیان شدند. در نهایت، نتایج حاصل از بهینه‌سازی با داده‌های میدانی و مطالعات قبلی مقایسه شد تا اعتبار و قابلیت تعمیم آن‌ها بررسی شود.

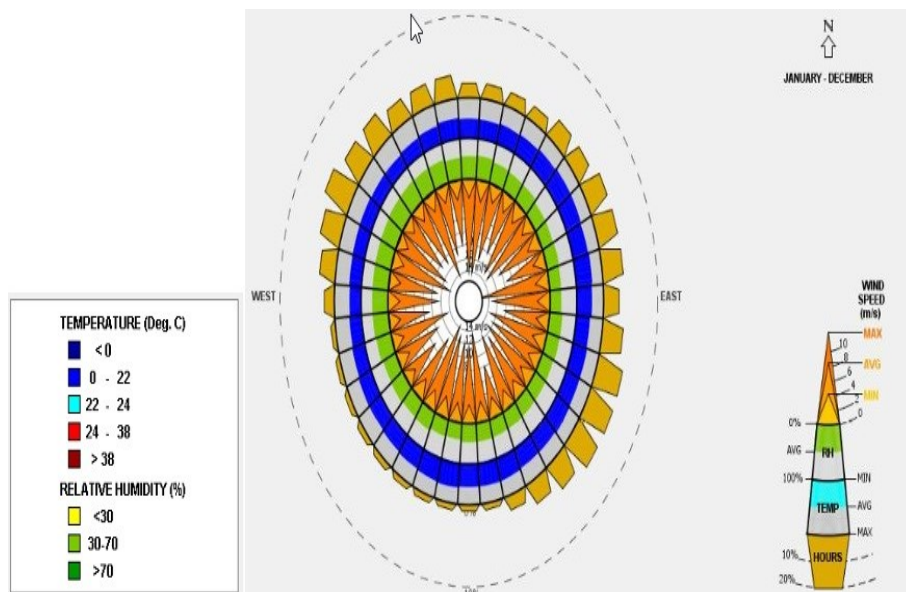
شرح و تفسیر نتایج

تحلیل داده‌های میدانی نشان داد که ساختمان‌های مسکونی در بناب در دوره زمستانی مصرف گاز به میانگین ۳۵ مترمکعب به ازای هر مترمربع سطح زیربنا دارند. این میزان مصرف حدود ۲۰ درصد بیشتر از استاندارد ملی برای ناحیه اقلیمی مشابه است (سازمان انرژی ایران، ۱۴۰۳). همچنین، مصرف برق در دوره تابستانی به میانگین ۱۲۰ کیلووات‌ساعت به ازای هر مترمربع سطح زیربنا به دلیل استفاده گسترده از سیستم‌های سرمایشی تکمیلی است (جدول ۱).

جدول ۱: وضعیت مصرف انرژی در آپارتمان‌های شهر بناب

پارامتر	مقدار	مقایسه با استاندارد	منبع
مصرف گاز در زمستان	۲۵ مترمکعب به ازای هر مترمربع سطح زیربنا	۲۰ درصد بیشتر از استاندارد ملی برای ناحیه اقلیمی مشابه	سازمان انرژی ایران
مصرف گاز در تابستان	۱۲۰ کیلووات ساعت به ازای هر مترمربع سطح زیربنا	-	نتایج میدانی پژوهش
دلیل مصرف بالای برق در تابستان	استفاده گسترده از سیستم‌های سرمایشی تکمیلی	-	نتایج میدانی پژوهش
نوع اقلیم	سرد (طبقه‌بندی کوپن)	-	سازمان هواشناسی، ۱۴۰۳

تحلیل دمای داخلی نشان داد که اختلاف دمای داخلی و خارجی در ساعات اوج نیاز به گرمایش (ساعات ۴ تا ۶ صبح) به طور متوسط ۲۴ درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده نیاز قابل توجه به گرمایش است. همچنین، مشاهده شد که در ساختمان‌های با نسبت پنجره به دیوار بیش از ۴۰ درصد، نوسانات دمایی داخلی بیشتر است و دمای داخلی به سرعت با دمای خارجی هماهنگ می‌شود. شکل (۲) نمودار گلباد شهر بناب را از نظر میانگین اختلاف درجه حرارت (نوسانات دمایی) در سال ۱۴۰۳ نشان می‌دهد.



شکل ۲: گلباد میانگین دمای شهر بناب در سال ۱۴۰۴

همچنین مقاومت حرارتی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مختلف مورد بررسی به صورت جدول (۲) به دست آمده است.

جدول ۲. مقاومت حرارتی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مختلف دیوارها در بناب

نوع دیوار	ضخامت (سانتی‌متر)	مقاومت حرارتی (m^2K/W)
سفالی بدون عایق	۲۰	۰/۴۵
سفالی با عایق XPS 5cm	۲۵	۱/۶۲
لیکا بدون عایق	۲۰	۰/۸۸
لیکا با عایق XPS 10cm	۳۰	۲/۷۶
AAC بدون عایق	۲۰	۱/۳۵
AAC با عایق XPS 10cm	۳۰	۳/۴۲
AAC با عایق پشم‌سنگ ۸cm	۲۸	۳/۱۵

تحلیل همبستگی بین پارامترهای مختلف و مصرف انرژی نشان داد که مقاومت حرارتی دیوارها و نسبت پنجره به دیوار دو عامل مؤثرتر در مصرف انرژی هستند. همبستگی بین مقاومت حرارتی و مصرف گرمایشی ۰/۷۸- بود که نشان‌دهنده رابطه معکوس قوی است. همچنین، همبستگی بین نسبت پنجره به دیوار و مصرف گرمایشی ۰/۶۵ است که نشان‌دهنده رابطه مستقیم است (رضایی، ۱۴۰۳: ۸۹).

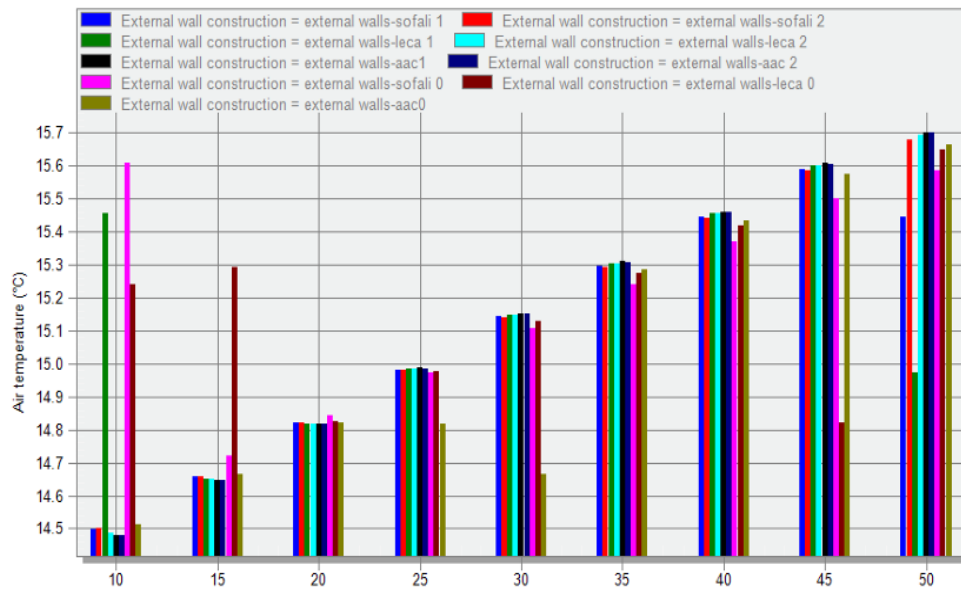
علاوه بر این، نتایج بهینه‌سازی پارامتریک نشان داد که ترکیب بلوک AAC با عایق پلی‌استایرن اکستروژده (XPS ۱۰ سانتی‌متری) به عنوان بهترین گزینه برای دیوارهای خارجی در بناب شناسایی شد. این ترکیب مقاومت حرارتی حدود ۳/۴۲ m^2K/W را ارائه داده و می‌تواند مصرف انرژی گرمایشی را تا ۴۲ درصد نسبت به دیوارهای سفالی استاندارد کاهش دهد. در مورد نسبت پنجره به دیوار، نتایج نشان داد که نسبت بهینه در بناب بین ۲۵-۳۵ درصد است. در این محدوده، تعادل مناسبی بین نورگیری طبیعی و کاهش اتلاف حرارت ایجاد می‌شود. تحلیل‌های جزئی‌تر نشان داد که برای جهت‌های جنوبی و غربی، نسبت بهینه ۳۰-۳۵ درصد و برای جهت‌های شمالی و شرقی، نسبت بهینه ۲۵-۳۰ درصد است (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج بهینه‌سازی عملکرد حرارتی برای ساختمان‌های نمونه در بناب

نمونه	مصالح دیوار	ضخامت عایق (سانتی‌متر)	نسبت پنجره به دیوار (درصد)	گرمایشی EUI^1 ($kWh/m^2 \cdot yr$)	سرمایشی EUI ($kWh/m^2 \cdot yr$)	کل EUI ($kWh/m^2 \cdot yr$)
۱	سفالی	بدون عایق	۲۵	۱۵۸/۲	۷۲/۵	۲۳۰/۷
۲	سفالی	XPS 5	۳۰	۱۲۵/۸	۶۵/۳	۱۹۱/۱
۳	لیکا	بدون عایق	۳۰	۱۳۲/۶	۶۸/۹	۲۰۱/۵
۴	لیکا	XPS 10	۲۵	۸۹/۴	۵۲/۱	۱۴۱/۵
۵	AAC	بدون عایق	۳۰	۱۰۵/۷	۵۸/۳	۱۶۴
۶	AAC	XPS 10	۳۰	۶۱/۸	۴۲/۵	۱۰۴/۳
۷	AAC	پشم‌سنگ ۸	۳۵	۶۸/۲	۴۵/۷	۱۱۳/۹
۸	بهینه	XPS 10	۳۰	۵۸/۳	۴۱/۲	۹۹/۵

مطابق جدول ۲، نمونه بهینه با ترکیب بلوک AAC، عایق XPS 10 سانتی‌متری، و نسبت پنجره به دیوار ۳۰ درصد، بهترین عملکرد را با EUI کل ۹۹/۵ $kWh/m^2 \cdot yr$ ارائه می‌دهد. این مقدار حدود ۵۷ درصد کمتر از نمونه استاندارد سفالی بدون عایق است. همچنین، برای بهبود عملکرد نورگیری، استفاده از شیشه‌های دابل با پوشش low-E و گاز آرگون پیشنهاد شده است که با حفظ نورگیری مطلوب، اتلاف حرارت را کاهش می‌دهد (شکل ۳).

¹ شاخص مصرف انرژی ساختمان (Energy Use Intensity)



شکل ۳: تحلیل حساسیت مصرف انرژی در نمونه‌های مختلف

تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر در نوع مصالح دیوار اصلی و ضخامت عایق تأثیر بیشتری بر عملکرد حرارتی دارد. تغییر در نوع مصالح دیوار اصلی می‌تواند تا ۳۵ درصد در مصرف انرژی تأثیر بگذارد، در حالی که تغییر در ضخامت عایق تا ۳۰ درصد تأثیر دارد. نسبت پنجره به دیوار نیز تا ۲۵ درصد در مصرف انرژی مؤثر است (رضایی‌نیا، ۱۴۰۳: ۱۲۱).

برای اعتبارسنجی نتایج بهینه‌سازی، داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های میدانی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل توانسته است دمای داخلی را با خطای میانگین مطلق (MAE 1.2) درجه سانتی‌گراد و ضریب همبستگی ۰/۸۹ پیش‌بینی کند. این دقت برای اهداف بهینه‌سازی قابل قبول است و نشان می‌دهد که مدل‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق عملکرد حرارتی ساختمان‌ها در شرایط واقعی هستند. همچنین، مصرف انرژی پیش‌بینی شده برای نمونه‌های بهینه با داده‌های میدانی مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل پیش‌بینی‌های مصرف انرژی را با خطای حدود ۸-۱۲ درصد انجام داده است. این خطا عمدتاً به دلیل عدم قطعیت در الگوهای مصرف ساکنان و شرایط دقیق عملکرد سیستم‌های گرمایشی/سرمایشی است (محمدی، ۱۴۰۳: ۹۳). بنابراین می‌توان گفت که با وجود هزینه اولیه بیشتر برای ساخت دیوارهای با مصالح AAC و عایق‌بندی مناسب، بازگشت سرمایه‌گذاری در طول دوره عمر ساختمان به دلیل کاهش مصرف انرژی محقق می‌شود. برای نمونه بهینه شناسایی شده، هزینه اولیه حدود ۳۵ درصد بیشتر از دیوارهای سفالی استاندارد است، اما این هزینه اضافی در طی ۷-۸ سال از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی جبران می‌شود. تحلیل زیست‌محیطی نیز نشان داد که استفاده از نمونه بهینه می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را تا ۴۵ درصد کاهش دهد. با فرض متوسط انتشار ۰/۸ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر کیلووات‌ساعت انرژی گرمایشی، کاهش مصرف انرژی در ساختمان بهینه منجر به کاهش ۴۵ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر مترمربع سطح زیربنا در سال می‌شود (انجمن انرژی ایران، ۱۴۰۳).

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی ترکیبی از شبیه‌سازی کامپیوتری و اعتبارسنجی میدانی، به بررسی و بهینه‌سازی عملکرد حرارتی دیوارهای خارجی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم سرد شهر بناب پرداخت.

بر اساس نتایج یافته‌های پژوهش ترکیب بلوک‌های AAC با عایق پلی‌استایرن اکستروژده (XPS) به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر به عنوان بهترین گزینه برای دیوارهای خارجی در شرایط اقلیمی بناب شناسایی شد. این ترکیب با مقاومت حرارتی حدود ۳/۴۲ m²K/W قادر است مصرف انرژی گرمایشی را تا ۴۲ درصد نسبت به دیوارهای سفالی استاندارد کاهش دهد. این کاهش در مصرف

انرژی نه تنها از نظر اقتصادی مفید است، بلکه از نظر زیست‌محیطی نیز اهمیت دارد. علاوه بر این، نسبت بهینه پنجره به دیوار در بناب در محدوده ۲۵-۳۵ درصد قرار دارد. در این محدوده، تعادل مناسبی بین نورگیری طبیعی حداکثری و کاهش اتلاف حرارت ایجاد می‌شود. تحلیل‌های دقیق‌تر نشان داد که این نسبت باید بر اساس جهت‌گیری پنجره‌ها تنظیم شود؛ برای جهت‌های جنوبی و غربی (در معرض نور خورشید بیشتر)، نسبت بهینه ۳۰-۳۵ درصد و برای جهت‌های شمالی و شرقی، نسبت بهینه ۲۵-۳۰ درصد است. می‌توان گفت که استفاده از شیشه‌های دوبل با پوشش کم‌گسیل (low-E) و گاز آرگون برای پنجره‌ها می‌تواند عملکرد حرارتی را تا ۲۵ درصد بهبود بخشد و در عین حال، نورگیری طبیعی را حفظ کند. این یافته نشان می‌دهد که تلفیق فناوری‌های پیشرفته با مصالح مناسب می‌تواند به عملکرد حرارتی بهینه‌تری منجر شود. تحلیل‌های اقتصادی نشان داد که با وجود هزینه اولیه بیشتر (حدود ۳۵ درصد) برای ساخت دیوارهای بهینه، بازگشت سرمایه در طی ۷-۸ سال از طریق صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی محقق می‌شود. این امر نشان‌دهنده جذابیت اقتصادی بلندمدت این راهکارهاست و می‌تواند برای سازندگان و سرمایه‌گذاران توجیه اقتصادی مناسبی فراهم کند. نتایج زیست‌محیطی نشان داد که استفاده از دیوارهای بهینه می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را تا ۴۵ درصد کاهش دهد. با توجه به اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایران در چارچوب توافق‌های بین‌المللی، این کاهش قابل توجه می‌تواند در دستیابی به این اهداف مؤثر باشد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج برخی مطالعات مشابه در مناطق دیگر ایران و جهان قابل مقایسه است. در مطالعه‌ای که توسط مقرری (۱۴۰۳) در شهر تبریز انجام شد، بلوک‌های AAC با عایق XPS به عنوان بهترین گزینه شناسایی شد که این نتیجه با یافته‌های حاضر همخوانی دارد. با این حال، نسبت بهینه پنجره به دیوار در آن مطالعه ۳۰-۴۰ درصد گزارش شده بود که نشان‌دهنده تفاوت‌های اقلیمی بین بناب و تبریز است.

در مطالعه‌ای که توسط وانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۳) در اقلیم سرد چین انجام شد، بلوک‌های بتنی سبک با عایق پلی‌اورتان به عنوان بهترین گزینه شناسایی شد. اگرچه مصالح متفاوتی پیشنهاد شده بود، اما اصل استفاده از مصالح سبک با مقاومت حرارتی بالا با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. در آن مطالعه نیز نسبت بهینه پنجره به دیوار در محدوده ۲۵-۳۵ درصد گزارش شده بود که با نتایج حاضر کاملاً همخوانی دارد.

در مقابل، نتایج این پژوهش با برخی مطالعات در خارج از کشور تفاوت‌هایی دارد. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط گارسیا^۲ و همکاران (۲۰۲۴) در کانادا انجام شد، پیشنهاد شده بود که دیوارها با ضخامت بیشتر (حداقل ۳۰ سانتی‌متر عایق) برای اقلیم‌های بسیار سرد مناسب‌ترند. این تفاوت به دلیل سخت‌تر بودن اقلیم کانادا نسبت به بناب است. بناب دارای شرایط سرد با دمای حداقل مطلق ۲۲- درجه سانتی‌گراد است، در حالی که بسیاری از شهرهای کانادا دمای حداقل مطلق کمتر از ۳۵- درجه سانتی‌گراد دارند.

تفاوت دیگر این پژوهش با برخی مطالعات داخلی مانند پژوهش کاظمی و همکاران (۱۴۰۲) در شهر ارومیه، تأکید بر اعتبارسنجی میدانی است. بسیاری از مطالعات قبلی تنها بر اساس شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بوده‌اند و فاقد داده‌های میدانی برای اعتبارسنجی بوده‌اند. در پژوهش حاضر، استفاده از داده‌های واقعی مصرف انرژی و دما در ساختمان‌های موجود بناب باعث شده تا نتایج قابل اعتمادتر و قابل تعمیم به شرایط واقعی باشند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، چندین پیشنهاد برای معماران، مهندسان، سیاست‌گذاران، و پژوهشگران ارائه می‌شود:

تدوین دستورالعمل‌های منطقه‌ای برای طراحی دیوارهای خارجی: بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود سازمان‌های مرتبط با ساخت‌وساز در استان آذربایجان شرقی، دستورالعمل‌های منطقه‌ای برای طراحی دیوارهای خارجی ساختمان‌ها در شهر بناب و مناطق همجوار با شرایط اقلیمی مشابه تدوین کنند. این دستورالعمل‌ها باید حداقل مقاومت حرارتی مورد نیاز (حداقل ۲/۵ m²K/W برای منطقه بناب)، نسبت بهینه پنجره به دیوار (۲۵-۳۵ درصد)، و توصیه‌هایی در مورد نوع مصالح و عایق‌های مناسب ارائه دهند. تدوین چنین دستورالعمل‌هایی نه تنها به بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها کمک می‌کند بلکه با حفظ هویت معماری

¹ Wang² Garcia

محلی نیز سازگار است. دستورالعمل‌های منطقه‌ای باید بر اساس شرایط ویژه اقلیمی و اجتماعی بناب تدوین شوند و به‌روزرسانی‌های دوره‌ای داشته باشند.

تشویق مالیاتی برای استفاده از مصالح انرژی‌کارآمد: با توجه به هزینه اولیه بالاتر مصالح انرژی‌کارآمد مانند بلوک‌های AAC، پیشنهاد می‌شود از سوی دولت و سازمان‌های محلی، مشوق‌های مالیاتی و بانکی برای سازندگانی که از این مصالح استفاده می‌کنند ارائه شود. این مشوق‌ها می‌تواند شامل کاهش نرخ مالیات بر املاک برای ساختمان‌های با عملکرد انرژی بالا، ارائه وام‌های با نرخ بهره پایین برای خرید مصالح انرژی‌کارآمد، یا کاهش هزینه‌های شهرداری برای پروانه‌های ساختمانی با استانداردهای انرژی مشخص باشد. این رویکرد نه تنها از نظر اقتصادی مفید است بلکه به سمت توسعه پایدار نیز حرکت می‌کند. تجربه کشورهای پیشرفته نشان می‌دهد که مشوق‌های مالی می‌توانند انتقال به سمت ساختمان‌های پایدار را تسریع کنند.

آموزش و توانمندسازی سازندگان و معماران محلی: یکی از موانع اصلی در استفاده از مصالح جدید مانند بلوک‌های AAC، کمبود آگاهی و تجربه سازندگان و معماران محلی است. پیشنهاد می‌شود دوره‌های آموزشی اختصاصی برای معماران، مهندسان، و اجرایی‌های ساختمانی در بناب برگزار شود که ضمن معرفی مزایای این مصالح، نحوه صحیح اجرا و اتصالات آن‌ها نیز آموزش داده شود. این دوره‌ها می‌تواند همکاری با دانشگاه‌های محلی و شرکت‌های تولیدکننده مصالح برگزار شود. ایجاد یک مرکز مشاوره انرژی در شهر بناب نیز می‌تواند به عنوان یک منبع دائمی برای پاسخ به سؤالات فنی و مشاوره‌ای در این زمینه عمل کند. این مرکز می‌تواند به انتقال دانش فنی به سازندگان محلی کمک کند و موانع اجرایی را کاهش دهد.

تحقیقات بیشتر در زمینه مصالح بومی و سنتی: با وجود مزایای بلوک‌های AAC، پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در زمینه بهبود عملکرد حرارتی مصالح بومی و سنتی منطقه بناب انجام شود. مصالحی مانند خشت و سنگ اگر به درستی طراحی و اجرا شوند، می‌توانند عملکرد حرارتی قابل قبولی داشته باشند و همچنین با حفظ هویت معماری محلی سازگار باشند. این تحقیقات می‌تواند در جهت ترکیب فناوری‌های مدرن با مصالح سنتی حرکت کند، مانند استفاده از عایق‌های طبیعی در دیوارهای خشتی یا بهبود روش‌های ساخت سنتی با استفاده از تکنیک‌های مدرن. تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی در این زمینه می‌تواند منجر به ارائه گزینه‌های مناسب اقتصادی‌تر و فرهنگی‌تر برای ساخت و سازهای محلی شود.

ایجاد بانک اطلاعات مصرف انرژی ساختمان‌های بناب: برای پایش مستمر عملکرد انرژی ساختمان‌ها و به‌روزرسانی دستورالعمل‌ها، پیشنهاد می‌شود یک بانک اطلاعاتی از مصرف انرژی ساختمان‌های بناب ایجاد شود. این پایگاه داده می‌تواند شامل اطلاعات سالانه مصرف انرژی، مشخصات ساختمانی، مصالح مورد استفاده، و سیستم‌های تأسیساتی باشد. با جمع‌آوری این داده‌ها در طول زمان، می‌توان روندهای مصرف انرژی را تحلیل کرد و سیاست‌ها را بر اساس شواهد بهبود بخشید. این پایگاه داده همچنین می‌تواند به عنوان مرجعی برای اعتبارسنجی مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی آینده عمل کند. ایجاد چنین پایگاه داده‌ای می‌تواند با همکاری شهرداری بناب، شرکت توزیع گاز، و شرکت توزیع برق انجام شود.

در نهایت، باید توجه داشت که بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها تنها یک جنبه از معماری پایدار است. این بهبود باید در کنار سایر ابعاد پایداری شامل طراحی برای اقلیم‌های آینده، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مدیریت آب، و استفاده از مصالح با چرخه عمر پایین کربن در نظر گرفته شود. با این رویکرد جامع، می‌توان به ساخت ساختمان‌هایی دست یافت که نه تنها انرژی‌کارآمد هستند، بلکه برای ساکنان سالم‌تر و برای محیط زیست پایدارتر نیز باشند.

ملاحظات اخلاقی

نویسنده در انجام و انتشار این پژوهش علمی، اصول اخلاقی را رعایت کرده و این امر مورد تأیید است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر از حمایت مالی هیچ سازمان و یا موسسه‌ای برخوردار نبوده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Ahmadi, N., & Tavakoli, R. (2023). Parametric optimization of building envelopes in cold climates: A case study of Tabriz. *Journal of Building Engineering*, 65, 105879.
- Ahmadi, N., Tavakoli, R., & Kiani, A. (2023). Field validation of thermal performance simulation in residential buildings: A case study in Northwest Iran. *Building and Environment*, 228, 109834.
- Al-Homoud, M. S. (2021). Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 30(1), 7-129.
- ASHRAE. (2020). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Chen, Y., & Liu, Sh. (2024). Robust optimization for building envelope design under climatic uncertainty. *Energy and Buildings*, 298, 113765.
- Garcia, M., Rodriguez, P., & Fernandez, A. (2024). Social and cultural factors in sustainable building design: Lessons from traditional architecture in cold climates. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104563.
- Ghorbanian, A., & Naderi, M. (2024). Thermal performance of traditional and modern building materials in cold and arid climates: Case study of Yazd, Iran. *Journal of Architectural Engineering*, 30(2), 04024006.
- Hosseini, M., Rezvani, A., & Naderi, S. (2023). Thermal mass effect on energy consumption in residential buildings of cold regions: A case study in Urmia, Iran. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(2), 212-225.
- IEA. (2023). *Global Energy Review 2023*. International Energy Agency.
- Iran Energy Organization. (2024). *National report on energy consumption in the building sector*. Tehran: Ministry of Energy. (In Persian)
- Iran Meteorological Organization. (2024). *Climatic statistics and data for Bonab city*. Tehran: Iran Meteorological Organization. (In Persian)
- Johnson, D. R. (2023). Combined qualitative and quantitative methods in building performance research: Theory and practice. *Building Research & Information*, 51(1), 43-58.
- Kazemi, M., & Salehi, A. (2022). Analysis of window-to-wall ratio in residential buildings of cold and dry climates using energy simulation. *Architecture & Environment*, 12(2), 89-104. (In Persian)
- Kazemi, M., & Tavakoli, H. (2024). Optimization of window-to-wall ratio in cold and arid climates: A case study of Tabriz. *Energy and Buildings*, 288, 112987.
- Kazemi, M., Tavakoli, H., & Hosseini, M. (2023). Validation and calibration of DesignBuilder for simulation of residential buildings in cold climates of Iran. *Building Simulation*, 16(2), 87-99.
- Lee, S., Kim, J., & Park, Ch. (2023). Optimal insulation thickness for building walls in cold climates: A comprehensive energy and economic analysis. *Energy and Buildings*, 280, 112745.
- Li, X., & Chen, Y. (2023). Advanced glazing systems for energy-efficient buildings in cold climates: Performance analysis and optimization. *Solar Energy*, 251, 87-98.
- Liu, B., Wang, Ch., & Zhang, D. (2023). Impact of wall insulation on heating energy consumption in cold climate residential buildings: Field measurement and simulation. *Energy and Buildings*, 280, 112710.
- Mogharrabi, A. (2024). Optimization of residential building envelopes in the cold climate of East Azerbaijan Province. *Journal of Architectural Engineering*, 32(1), 43-58. (In Persian)
- Mohammadi, A. (2023). Investigating the thermal performance of residential buildings in Iran's cold and dry climate. *Arman Shahr Architecture & Urbanism*, 16(4), 89-102. (In Persian)
- Naderi, M., Rezvani, A., & Hosseini, M. (2024). Comparative thermal performance of AAC and LECA blocks in cold and dry climatic conditions. *Scientific-Research Journal of Building*, 25(3), 109-124. (In Persian)

- Naderi, S., & Rezvani, A. (2023). Genetic algorithm optimization for building envelope design in cold climates. *Journal of Building Performance Simulation*, 16(3), 132-145.
- Naderi, S., Hosseini, M., & Rezvani, A. (2024). Optimal window-to-wall ratio for residential buildings in cold and arid climates. *Building and Environment*, 247, 110943.
- Okeil, A. M., & Elsayed, A. (2020). Thermal characteristics and energy saving potentials of low-emissivity coating and aerogel-filled glazing units. *Energies*, 13(2), 461.
- Petrovski, A., Zileska-Pancovska, V., & Zujo, V. (2023). Improving building sustainability by optimizing facade solar illumination use in cold and arid regions. *Building and Environment*, 232, 110132.
- Rezaei, F. (2022). Traditional architecture and indigenous materials in Iran's cold and dry climate. *Iranian Architecture Studies*, 9(2), 63-80. (In Persian)
- Rezaei, M. (2023). Investigating the thermal performance of clay and AAC walls in cold climatic conditions. *Architecture & Sustainable Development*, 11(3), 75-90. (In Persian)
- Rezaeinia, M. (2024). Sensitivity analysis of parameters affecting the thermal performance of residential buildings in cold climates. *Scientific Journal of the Faculty of Engineering*, 25(1), 119-135. (In Persian)
- Rezaeinia, M., Hosseini, M., & Kazemi, A. (2023). Validation of thermal simulation models using field data from buildings in Bonab. *Architectural Engineering*, 30(4), 109-126. (In Persian)
- Shi, Y., Li, J., & Zhang, H. (2023). Multi-objective optimization framework for building envelope design considering energy, economic, and environmental aspects. *Applied Energy*, 332, 120487.
- Smith, J., Brown, A., & Johnson, M. (2023). Mid-rise residential buildings in cold climates: Specific challenges and design strategies. *Journal of Building Engineering*, 68, 108043.
- Wang, L., & Brown, T. (2023). Algorithm selection for building energy optimization: Comparing genetic algorithms and gradient-based methods. *Building Simulation*, 16(4), 143-160.
- Wang, R., Zhang, Q., & Li, X. (2023). Window-to-wall ratio optimization for energy efficiency in cold climate residential buildings: A multi-objective approach. *Energy and Buildings*, 289, 113042.
- Wang, Sh., Chen, Y., & Liu, Zh. (2022). Impact of window-to-wall ratio on energy consumption and daylighting in residential buildings: A comprehensive analysis. *Building and Environment*, 220, 109276.
- Zhang, Da, & Liu, Bin. (2023). Advanced glazing systems for energy-efficient buildings in cold climates: Performance analysis and optimization. *Solar Energy*, 251, 176-189.
- Zhang, Y., & Liu, X. (2022). Field validation of building energy simulation tools: A critical review. *Energy and Buildings*, 268, 112190.
- Zhou, L., & Wang, H. (2023). Performance comparison of different thermal insulation materials for building envelopes in cold climates. *Construction and Building Materials*, 376, 130985.

