Sustainable Urban & Regional Development Studies Quarterly
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 152-179
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

Analysis and Optimization of Energy Consumption in Newly Built Babol City Schools: Sustainable Strategies for Enhancing Energy Performance

Rouhollah Rahimi[1*], Fatemeh Firouzmandi Bandpey [2]
1.Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran
2.M.Sc. Student in Architectural Engineering, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

ARTICLEINFO

Research Paper

Article history:
Received: 16 May 2026
Accepted: 05 August 2026
Published online:
07 August 2026

Keywords*: Energy Optimization, Educational Buildings, Sustainable Development, Babol.*

https://www.srds.ir/?adsc=4192

Abstract

Background and Objective: Due to increasing global concerns about climate change and the necessity of reducing energy consumption in line with sustainable development, optimizing energy consumption in educational buildings is of particular importance because of their key role in energy consumption patterns and their direct impact on user comfort and productivity. This study investigates the energy performance of four newly built schools in Babol (Noshirvani, Shokouh, Bonyad-e-Barekat, and Shahrabi) in a temperate and humid climate and presents strategies for reducing energy consumption and improving thermal comfort.

Methodology: This applied study was conducted through field surveys, detailed simulation in DesignBuilder software (based on the EnergyPlus engine), and climate analysis using Climate Consultant software. Four schools with a construction history of less than 5 years were selected. Optimization strategies evaluated included thermal insulation of roofs and walls with polystyrene, temperature setpoint adjustment, natural ventilation, replacement of conventional windows with low-emissivity double-glazed windows, and installation of 30 kW solar panels. Model validation was performed using actual utility bills.

Results and findings: This applied study was conducted through field surveys, detailed simulation in DesignBuilder software (based on the EnergyPlus engine), and climate analysis using Climate Consultant software. Four schools with a construction history of less than 5 years were selected. Optimization strategies evaluated included thermal insulation of roofs and walls with polystyrene, temperature setpoint adjustment, natural ventilation, replacement of conventional windows with low-emissivity double-glazed windows, and installation of 30 kW solar panels. Model validation was performed using actual utility bills.

Citation. Rahimi, R. & Firozmandi bandpi, F. (2027). Analysis and Optimization of Energy Consumption in Newly Built Babol City Schools: Sustainable Strategies for Enhancing Energy Performance. ***Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS),*** 7(4), 152–179.
https://www.srds.ir/article_250320.html?lang=en

© The Author(s). Publisher: ***Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association.***

Corresponding author: Email: r.rahimi@umz.ac.ir*

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 152-179
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

With increasing concerns about climate change and the negative impacts of human activities on the environment, optimizing energy consumption in buildings has become one of the main priorities of sustainable development policies. Buildings, as one of the largest sources of energy consumption and greenhouse gas emissions, play a key role in achieving environmental goals. Near-zero energy buildings (NZEBs) have been introduced as an effective solution to reduce energy consumption and carbon emissions (Zhen et al., 2025).

One of the main challenges in the building sector is heating and cooling systems and the high consumption of electrical devices, which lead to high energy consumption. The energy supply for this sector mainly comes from fossil fuels, and due to the growing urbanization and population, this consumption is expected to increase. Heavy dependence on fossil fuels is associated not only with environmental challenges but also with health problems (Parvin et al., 2025). In response to these challenges, various countries have developed strategies to reduce energy consumption and greenhouse gases in public buildings and increase the use of renewable sources (Park & Lee, 2020).

Iran, as one of the richest countries in the world in terms of fossil energy resources, is also one of the largest energy consumers. Carbon dioxide emissions from energy consumption in buildings reach 127 million tons per year, which is about 4.5 times the global average. The building sector accounts for more than one-third of total energy consumption, and 70% of this consumption is related to government buildings, especially educational institutions (Soleimani et al., 2020).

This study evaluates energy consumption in schools in Babol and provides optimization strategies. The aim of this research is to identify architectural weaknesses and provide practical suggestions for improving energy consumption in these schools. Through field observations and the use of DesignBuilder software, energy modeling is performed to examine physical problems in selected schools.

Methodology

This research is applied in terms of purpose and is based on field studies, software simulation, and library research. Initially, based on field study, building plans, energy consumption conditions, and the type of materials and components used in the building were determined. Using the EPW file in Climate Consultant software, the climate information of the region, comfort range, and critical conditions were analyzed. For building energy simulation, DesignBuilder software was used, which utilizes the EnergyPlus modeling engine.

Study Area and Climate: Babol is a city in northern Iran, Mazandaran province, with a temperate and humid climate. The average annual temperature is about 15°C, with summers averaging about 25°C and winters about 5°C. Annual rainfall is about 1000–1200 mm, and average annual humidity is about 70–80%.

Case Studies: Four newly built schools in Babol (construction age under 5 years) were selected: Noshirvani (elementary, 1,880 m²), Shokouh (elementary, 1,245 m²), Bonyad-e-Barekat (secondary, 1,150 m²), and Shahrabi (secondary, under construction, 1,705 m²).

Simulation Assumptions: Wall U-value of 0.7 W/m²K; roof U-value of 1.1 W/m²K; cooling system: split AC; heating system: package unit and radiator with 85% efficiency; LED lighting at 7.5 W/m²; equipment power at 4 W/m²; setpoints: cooling 24°C, heating 22°C; occupancy: 0.2 persons/m²; double-glazed windows with UPVC frames.

Validation: The simulation models were calibrated using actual utility bills for the three operational schools. Results showed excellent agreement: CV(RMSE) values below 9.2% and R^2 above 0.91 for all schools (Barekat: R^2=0.93, MAPE=6.9%, CV(RMSE)=8.7%; Shokouh: R^2=0.91, MAPE=7.4%, CV(RMSE)=9.2%; Noshirvani: R^2=0.94, MAPE=6.5%, CV(RMSE)=8.1%), well within ASHRAE Guideline 14 limits. For Shahrabi (under construction), a reference model approach based on national building codes was used.

Results and Discussion

Baseline Energy Consumption:

School	Energy Index (kWh/m²)	Category (Section 19)
Bonyad-e-Barekat	63.5	B (Secondary)
Shokouh	66.0	C (Elementary)
Noshirvani	58.8	B (Elementary)
Shahrabi	60.0	B (Secondary)

According to Appendix 3 of National Building Regulations, Section 19 (Climate A3), permissible limits for elementary schools in categories A–D are 32, 64, 95, and 127 kWh/m², and for secondary schools: 39, 79, 118, and 157 kWh/m². Achieving category A would require 45–52% reduction for elementary schools and approximately 38% reduction for secondary schools.

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 152-179
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

Optimization Strategies and Results:
Thermal Insulation (3 cm Polystyrene): Wall U-value reduced from 0.7 to 0.48 W/m²K (29% improvement); roof U-value reduced from 1.1 to 0.6 W/m²K (39% improvement). Energy reduction: 11–20.7%.
Temperature Setpoint Adjustment: Cooling setpoint from 24°C to 25°C; heating setpoint from 22°C to 21°C. Energy reduction: 16–19%.
Natural Ventilation (50% window opening): Implemented when outdoor temperature is lower than indoor during warm and mild seasons. Cooling energy reduction: 4.4–10%; total energy reduction: 2.2–5%.
Low-Emissivity Double-Glazed Windows: Heating energy reduction: up to 10%; total energy reduction: up to 5%. In Babol's humid climate, windows with moderate SHGC (0.4–0.5) and low U-value (below 1.4 W/m²K) are recommended to balance summer heat gain reduction and winter solar heat collection.
Solar Panels (30 kW capacity, 160 m², 19% efficiency): Annual electricity production: 46,485–48,521 kWh/year. Electricity supply coverage: up to 100% for Barekat and Shokouh schools.
Combined Strategies: When all strategies were applied together, total energy consumption decreased by 22–24% (Barekat: 22.2%, Shokouh: 24.1%, Noshirvani: 23.7%, Shahrabi: 24.1%). The combined reduction is somewhat less than the sum of individual effects due to interactive thermal effects in the humid climate, but the balanced combination remains highly effective.
Economic Analysis (Photovoltaic System):

Parameter	Value
Analysis period	20 years
Discount rate	5%
Electricity price	203.691 IRR/kWh
CO_2 cost	\$50/ton (190,000 IRR/USD)
Construction cost	22.5 million IRR/kW
Annual maintenance	2% of investment
Average annual production	47,595 kWh
CO_2 reduction	~28 tons/year

Net Present Value (NPV): ~2,592,700,000 IRR
Internal Rate of Return (IRR): ~38%
Benefit-Cost Ratio (BCR): 4.07
Simple Payback Period: ~2.6 years
These indicators demonstrate that solar PV systems, when accounting for environmental benefits, are not only environmentally sound but also highly profitable investments.

Conclusion

This study evaluated the energy performance of four newly built schools in Babol and provided optimization strategies. The results showed that the total energy consumption index in these schools ranges from 58.8 to 66 kWh/m² per year, indicating the need for design and operational improvements. The proposed strategies yielded significant results: insulation reduced energy consumption by 11–20.7%; temperature adjustment reduced consumption by 16–19%; natural ventilation reduced cooling energy by 4.4–10%; low-emissivity windows reduced heating energy by up to 10%; combined strategies achieved 22–24% energy reduction; and solar panels provided up to 100% of electricity needs with strong economic viability (IRR ~38%, payback <2.6 years). Comparison with national standards showed that the schools are currently in categories B and C, with potential to achieve category A through implementation of the proposed strategies.
These findings demonstrate that a combination of insulation, temperature management, natural ventilation, and renewable energy technologies can effectively reduce energy consumption and improve thermal comfort conditions. Given Babol's temperate and humid climate, emphasis on natural ventilation and the use of high-thermal-performance materials should be considered key strategies in the design and renovation of schools. The results of this research are not only applicable to Babol but can also be generalized to other regions with similar climates, serving as a model for sustainable development in the educational building sector.
It is recommended that future research examine the integrated effects of these strategies and analyze their economic and environmental impacts in more detail. Additionally, training users and school administrators in optimal operation of energy systems and proper equipment maintenance can contribute to the sustainability of results. This study represents a step toward achieving sustainable development goals and reducing environmental impacts in the education sector and can contribute to macro-policies on energy consumption optimization in Iran.

Declarations

Funding: There is no funding support.
Authors' Contribution: The authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.
Conflict of Interest: The authors declared no conflict of interest.

Journal of Sustainable Urban and Regional Development Studies
(JSURDS)
Vol 7. Issue 4 , Winter 2027, Pages 152-179
ISSN (Online): 2783-0764
Journal Hompage https://www.srds.ir/

Acknowledgments: We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

1.Ahmadi Soleimani, S. M., Eshraghi, M., & Zomorodian, Z. S. (2020). Optimization of energy consumption in educational buildings: A case study of Shahid Beheshti University. *Soffeh*, 32(3), 49-65.https://doi.org/10.52547/sofeh.32.3.49 [In Persian]

2.Bahalou-Houreh, N., & Borghei, S. M. R. (2023). Energy optimization of an educational building in Tehran with different configurations of windows, curtains, lighting system and temperature regulation along with economic analysis. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, *11*(1), 29-44. 10.22061/jsaud.2023.9529.2118 [In Persian]

3.Díaz-López, C., Serrano-Jiménez, A., Lizana, J., López-García, E., Molina-Huelva, M., & Barrios-Padura, Á. (2022). Passive action strategies in schools: A scientific mapping towards eco-efficiency in educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 45, 103598. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103598

4.Granados-López, D., Gatt Almaziad, D., Yousif, C., Díez-Mediavilla, M., & Alonso-Tristán, C. (2023). Exploitation of indoor illumination for typical flat dwellings in the Mediterranean area. *Energy Reports*, 9, 1473–1489. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.050

5.Islam, M. H., Safayet, M. A., & Al Mamun, A. (2024). Building performance analysis for optimizing the energy consumption of an educational building. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 42(4), 576–595. https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2022-0026

6.Jahangir, M. H., & Rashidi, R. (2022). Optimization of energy consumption in an educational building using physical scenarios. *Urban Planning and Regional Development*, 1(1), 73-88. 10.22034/jprd.2022.15046 [In Persian]

7.Jia, L. R., Han, J., Chen, X., Li, Q. Y., Lee, C. C., & Fung, Y. H. (2021). Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review. *Buildings*, 11(12), 591. https://doi.org/10.3390/buildings11120591

8.Liu, Y., Chen, H., Zhang, L., & Feng, Z. (2021). Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach. *Energy Reports*, 7, 5003–5012. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.053

9.Park, B., & Lee, S. (2020). Investigation of the energy saving efficiency of a natural ventilation strategy in a multistory school building. *Energies*, 13(7), 1746. https://doi.org/10.3390/en13071746

10.Park, H., Yeo, S.-H., Jeong, H., Kim, S., & Chang, S. J. (2025). Optimizing energy efficiency and sustainable utilization of national heritage through the remodeling of closed school buildings. *Energy and Buildings*, 328, 115168. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115168

11.Parvin, K., Hossain, M. J., Arsad, A. Z., Ker, P. J., & Hannan, M. A. (2025). Building energy technologies towards achieving net-zero pathway: A comprehensive review, challenges and future directions. *Journal of Building Engineering*, 92, 111795. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111795

12.Sayed Hassan Abdollah, A. (2023). Improved energy consumption and smart eco system for mosques in hot arid climates. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 101811. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101811

13.Soltani Nejad, Z., Ghasemi, M., & Soltani Nejad, M. (2024). Technical and environmental analysis of using a photovoltaic-thermal system to supply heating energy for a school building in Kerman. *Journal of Renewable and New Energy*, 11(1), 50-59. https://doi.org/10.22034/jrenew.2023.184649 [In Persian]

14.Tahersima, S., Haji Razaghi, S., & Azmouti, S. (2023). The effectiveness of hot water collectors and solar cells on heating and reducing energy consumption in elementary schools of Urmia. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 16(43), 153-176. https://doi.org/10.22034/aaud.2023.338109.2651 [In Persian]

15.Zhen, X., Li, S., Peng, J., Zhao, Z., Zhang, X., Tan, C., & Wu, W. (2025). Analysis of building envelope for energy consumption and indoor comfort in a near-zero-energy building in Northwest China. *Results in Engineering*, 24, 104243. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.104243

نوع مقاله: پژوهشی

فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای

https://www.srds.ir/article_250320.html?lang=fa

دوره هفتم، شماره چهارم، پیاپی (۲۶)، زمستان ۱۴۰۵

صص ۱۷۹-۱۵۲

تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در مدارس نوساز شهر بابل: راهبردهای پایدار برای بهبود عملکرد انرژی

روح اله رحیمی*: دانشیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

فاطمه فیروزمندی بندپی: دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

زمینه و هدف: با افزایش نگرانی‌های جهانی درباره تغییرات اقلیمی و ضرورت کاهش مصرف انرژی در راستای توسعه پایدار، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی به‌دلیل نقش کلیدی آن‌ها در الگوی مصرف و تأثیر مستقیم بر آسایش و بهره‌وری کاربران اهمیت ویژه‌ای یافته است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد انرژی و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی در چهار مدرسه نوساز شهر بابل شامل نوشیروانی، شکوه، بنیاد برکت و شهرابی، در اقلیم معتدل و مرطوب انجام شد.

روش شناسی: این مطالعه کاربردی با اتکا به برداشت‌های میدانی، شبیه‌سازی دقیق در نرم‌افزار DesignBuilderمبتنی بر موتور EnergyPlus، و تحلیل اقلیمی با Climate Consultantانجام گرفت. مدارس مورد بررسی کمتر از ۵ سال قدمت داشتند و راهکارهایی نظیر عایق‌کاری حرارتی سقف و دیوار با پلی‌استایرن، تنظیم دمای آسایش سیستم‌های سرمایش و گرمایش، بهره‌گیری از تهویه طبیعی، جایگزینی پنجره‌های معمولی با شیشه‌های کم‌گسیل و نصب پنل‌های خورشیدی ۳۰ کیلوواتی ارزیابی شد.

یافته‌ها و نتایج: نتایج نشان داد شاخص مصرف انرژی کل مدارس بین ۵۸٫۸ تا ۶۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال متغیر است. عایق‌کاری، مصرف انرژی را ۱۱ تا ۲۰٫۷ درصد کاهش داد و تنظیم دمای آسایش به‌تنهایی موجب صرفه‌جویی ۱۶ تا ۱۹ درصدی شد. تهویه طبیعی نیز بار سرمایش را ۴٫۴ تا ۱۰ درصد و مصرف کل انرژی را ۲٫۲ تا ۵ درصد کاهش داد. اجرای هم‌زمان راهکارها کاهش ۲۲ تا ۲۴ درصدی مصرف انرژی را به همراه داشت. تحلیل اقتصادی نیز نشان داد سامانه خورشیدی از نظر مالی بسیار توجیه‌پذیر است.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی انرژی، ساختمان‌های آموزشی، توسعه پایدار، بابل.

* **مسئول مکاتبات:** Email: r.rahimi@umz.ac.ir

ارجاع به این مقاله: رحیمی، روح اله و فیروزمندی بندپی، فاطمه. (۱۴۰۵). تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در مدارس نوساز شهر بابل: راهبردهای پایدار برای بهبود عملکرد انرژی. ***فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای***، ۷(۴)، ۱۵۲-۱۷۹.

این مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution(CC BY) توزیع شده است.

OPEN ACCESS

مقدمه و بیان مسأله

با افزایش نگرانی‌ها در مورد تغییرات اقلیمی و تأثیرات منفی فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از اولویت‌های اصلی سیاست‌های توسعه پایدار تبدیل شده است. ساختمان‌ها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش کلیدی در دستیابی به اهداف زیست‌محیطی دارند. به همین دلیل، ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی (NZEBs) به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن معرفی شده‌اند (Zhen et al., 2025).

یکی از چالش‌های اصلی در بخش ساختمان، سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی و مصرف بالای دستگاه‌های الکتریکی است که به مصرف زیاد انرژی منجر می‌شود. تأمین انرژی این بخش عمدتاً از منابع فسیلی مانند گاز طبیعی، برق، زغال‌سنگ و نفت خام صورت می‌گیرد و به دلیل رشد روزافزون شهرنشینی و جمعیت، انتظار می‌رود این مصرف افزایش یابد. وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی نه‌تنها با چالش‌های زیست‌محیطی، بلکه با مشکلات بهداشتی نیز همراه است (Parvin et al., 2025). در پاسخ به این چالش‌ها، کشورهای مختلف به توسعه استراتژی‌هایی برای کاهش مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای در ساختمان‌های عمومی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر پرداخته‌اند (Park & Lee, 2020).

ایران، به‌عنوان یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان در زمینه انرژی‌های فسیلی، با تولید ۲۱ درصد و توزیع ۴۱ درصد از ذخایر گاز طبیعی، در خاورمیانه پیشتاز است. این کشور یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی نیز محسوب می‌شود. انتشار گاز دی‌اکسیدکربن از مصرف انرژی در ساختمان‌ها، شامل منازل و واحدهای تجاری و عمومی، به ۱۲۷ میلیون تن در سال می‌رسد که حدود ۴٫۵ برابر میانگین جهانی است. بخش ساختمان، بیش از یک‌سوم کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد و ۷۰ درصد از این مصرف مربوط به ساختمان‌های دولتی است، به‌ویژه مؤسسات آموزشی. در مقایسه، مصرف انرژی در محیط‌های آموزشی در ایالات متحده حدود ۱۴ درصد و در اسپانیا و اروپا تقریباً ۴ و ۱۰ درصد است (Ahmadi Soleimani et al., 2020).

مدارس به‌عنوان تأسیسات ثابت در محیط‌های شهری و روستایی نیازمند نوسازی هستند. این نوسازی می‌تواند به بهبود کیفیت آسایش داخلی و بهره‌وری انرژی کمک کند. تحقیقات نشان می‌دهند که کلاس‌های آموزشی با چالش‌هایی نظیر کیفیت نامناسب هوای داخلی (IAQ)، مصرف بالای انرژی و کمبود آسایش دمایی و رطوبتی مواجه‌اند (Díaz-López et al., 2022). بر اساس گزارش‌های موجود، علی‌رغم مصرف انرژی بالا در ساختمان‌های آموزشی، شرایط آسایش مطلوب نیست. ازآنجاکه کیفیت محیط داخلی به‌صورت مستقیم بر بهره‌وری و سلامت کاربران تأثیر می‌گذارد، بهینه‌سازی مصرف انرژی بدون درنظرگرفتن کیفیت محیط داخلی کارایی لازم را ندارد تحقیقات مختلفی در مورد بهینه‌سازی مصرف انرژی در کشورهای متعدد انجام شده که نشان می‌دهند استفاده از راهکارهای بهینه‌سازی ۳۱% تا ۶۴%مصرف انرژی را کاهش داده است(Ghanbaran & Hosseinpour, 2016) .بنابراین، ارزیابی وضعیت تعمیرات و کیفیت محیط داخلی و بیرونی مدارس ضروری است تا بتوان استراتژی‌های مؤثری برای بهبود شرایط این فضاها طراحی کرد مطالعات گذشته نشان می‌دهند که عواملی مانند نوع ساختمان، سیستم‌های گرمایش و سرمایش، نورپردازی و مصالح ساختمانی تأثیرات قابل توجهی بر مصرف انرژی در مدارس دارند (Jia et al., 2021). همینطور مؤلفه‌های کالبدی معماری پایدار در فضای آموزشی، شاخص‌هایی چون بهره‌گیری از نور روز، بهبود کیفیت هوای داخلی، ارتباط با عناصر طبیعی، انتخاب آگاهانه مصالح و کاهش مصرف انرژی از طریق کالبد را برای مدارس پایدار برشمرده‌اند(Mojtabavi & Izadpanah, 2022).

تحقیق حاضر به ارزیابی مصرف انرژی در مدارس شهر بابل و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی آن می‌پردازد. هدف این پژوهش شناسایی نقاط ضعف معماری و پیشنهادهای عملی برای بهبود مصرف انرژی در این مدارس است. با مشاهدات میدانی و بهره‌گیری از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، مدل‌سازی انرژی انجام می‌شود تا مشکلات کالبدی در مدارس منتخب

بررسی گردد. این مطالعه می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و اثرات منفی زیست‌محیطی کمک کند و اقداماتی مؤثر برای توسعه پایدار ارائه دهد. در این پژوهش به‌صورت جامع بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی بابل تحلیل شده است. چهار مدرسه باسابقه ساخت زیر ۵ سال به‌عنوان نمونه انتخاب و وضعیت فعلی آن‌ها از لحاظ مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی بررسی می‌گردد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی انرژی، راهکارهای مناسب پیشنهاد و تأثیر هر یک بر کاهش مصرف انرژی و افزایش ساعات آسایش ارزیابی می‌شود. پرسش‌های مطرح شده به شرح زیر است:

۱.شرایط فعلی ساختمان‌های جدید ساخت مدارس شهر بابل از نظر مصرف انرژی در چه شرایطی قرار دارند؟

۲.چه راهکارهایی برای بهبود مصرف انرژی در مدارس بابل پیشنهاد می‌شود؟

۳.این راهکارها چه تأثیری بر مصرف انرژی مدارس این شهر می‌گذارد؟

مبانی نظری پژوهش

در سال‌های اخیر، توجه به بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها، به‌ویژه در فضاهای آموزشی، به یکی از موضوعات مهم پژوهشی تبدیل شده است. تحقیقات مختلف به تأثیر عوامل متعددی چون طراحی معماری، انتخاب مصالح، سیستم‌های تأسیساتی و اقلیم بر کاهش مصرف انرژی پرداخته‌اند. به طور خاص، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بهینه‌سازی طراحی ساختمان‌ها و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به‌صورت قابل‌توجهی به کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود شرایط آسایش کمک می‌کند. به‌عنوان‌مثال، پارک و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای بر روی بازسازی یک مدرسه بسته‌شده دهه ۱۹۳۰ در کره جنوبی، ثبت‌شده به‌عنوان میراث فرهنگی ملی، نشان دادند که بازسازی با رعایت قوانین حفاظت از میراث، مصرف انرژی را ۲۹ درصد (از ۱۹۰٫۷ به ۱۳۵٫۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع) کاهش داد، انتقال حرارتی را از ۱٫۴۷ به ۰٫۳۸ وات بر مترمربع کلوین و نشت هوا را از ۶۰۶٫۴ به ۱۱٫۰ در ساعت بهبود بخشید، و با اصلاح قوانین می‌توان مصرف انرژی را تا ۱۰۴٫۴ کیلووات‌ساعت بر مترمربع و کربن نهفته را ۳۲٫۶ درصد کاهش داد (Park et al. ,2024).

اسلام ومامون (۲۰۲۲)در پژوهش خود با استفاده از ابزار های و تحلیل انرژی ساختمان بررسی وارزیابی های انجام شده دریافتند که با به‌کارگیری مواد و سیستم‌های کارآمد، می‌توان تا ۳۲٫۳۸٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد و کربن تولیدی را تا ۲۸٫۸۵٪ کاهش داد. این نتایج اهمیت طراحی پایدار و انتخاب مواد مناسب در کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت زیست‌محیطی را تأکید می‌کنند (Islam, Safayet, & Al Mamun, 2024) . سید حسن عبدالله (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود مسجدی را در مصر با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی کرده و راهکارهایی مبتنی بر دمای داخلی و شرایط روشنایی ساختمان، برای بهبود مصرف انرژی پیشنهاد داده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با جایگزینی واحدهای روشنایی سنتی داخل مساجد با ال‌ای‌دی، می‌توان به میزان 9درصد در مصرف انرژی کل صرفه‌جویی کرد (Sayed Hassan Abdollah, 2023).

گرانادوس لوپز و همکاران (۲۰۲۳) نیز به بررسی شرایط نور طبیعی در آب‌وهوای مدیترانه‌ای جمهوری مالت پرداخته و محدوده روشنایی معمول را بر اساس استانداردهای بین‌المللی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی ساختمانی چندطبقه در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، راهکارهایی برای بهبود شرایط روشنایی طبیعی ارائه شده است. براین‌اساس افزایش اندازه پنجره‌ها و جایگزینی پنجره‌های تک‌جداره با پنجره‌های دوجداره که دارای پوشش انتخابی طیفی خارجی هستند، به طور قابل‌توجهی دسترسی به نور طبیعی را بهبود بخشیده و ساختمان را به شرایط استاندارد نزدیک می‌کند (Granados-López et al. 2023). در مطالعه لیو و همکارانش (۲۰۲۱) نیز با استفاده از نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر به ارزیابی مصرف انرژی یک ساختمان آموزشی با هدف بهینه‌سازی پارامترهای طراحی پرداخته بود. در این پژوهش، ده عاملی که ممکن است بر مصرف انرژی ساختمان تأثیر بگذارند، مانند ضریب انتقال حرارت سقف، نسبت بهره‌وری انرژی کولرگازی، ضخامت عایق دیوار بیرونی و... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در ادامه، بهترین سطح از هر عامل و ترکیب بهینه همه عوامل بر مبنای حداقل‌ترین حالت مصرف انرژی در ساختمان مشخص شده است(Liu et al., 2021).

سلطانی نژاد وهمکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با شبیه‌سازی سامانه فتوولتاییک-گرمایی برای گرمایش مدرسه ۲۴ کلاسه در اقلیم گرم و خشک کرمان، نشان دادند که این سامانه با کارایی بیش از ۵۰ درصد، ۴۱/۱ مگاوات-ساعت انرژی حرارتی در ماه‌های سرد و ۷۳ مگاوات-ساعت انرژی الکتریکی سالانه تولید می‌کند، بیش از ۵۳ تن آلاینده کاهش می‌دهد و ۸۶۵ میلیون ریال هزینه‌های اجتماعی صرفه‌جویی می‌کند (Soltaninejad et al., 2024).در پژوهش برقعی و بهارلو هوره(۱۴۰۲) که به بررسی بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان دانشکده مکانیک دانشگاه شهید رجایی با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر پرداخته‌اند، با ترکیب پیکربندی‌های مختلف پنجره، پرده، سیستم روشنایی و دماهای تنظیم، ۸۵ جای‌گشت مختلف ایجاد شده و ۱۰ حالت بهینه معرفی و رتبه‌بندی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بهترین حالت شامل پنجره دوجداره بدون سایه‌بان و سیستم روشنایی فلورسنت تری فسفر با دماهای تنظیم ۲۰ و ۲۸ درجه سلسیوس است .با اعمال شرایط بهینه، مصرف گاز تا ۴۳,۸۶٪ و مصرف برق تا ۱۱,۶۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین، این بهینه‌سازی منجر به کاهش ۱۱,۸۳٪ در میزان کربن‌دی‌اکسید تولیدی ساختمان می‌شود. این نتایج اهمیت طراحی بهینه و انتخاب تجهیزات مناسب را در کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی انرژی تأکید می‌کند(Boroughi & Baharlou-Horeh, 2023).

طاهرسیما و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهش خود با بررسی اثربخشی کلکتورهای آب گرم و سلول‌های خورشیدی در مدرسه ابتدایی دخترانه ارومیه، نشان دادند که این سیستم‌ها با تأمین ۸۱,۳ درصد آب گرم، راندمان ۴۹,۹ درصد، صرفه‌جویی ۲۶۷۰ مترمکعب گاز و تولید ۴۷ درصد برق از سلول‌های پشت‌بام و ۲۲,۳ درصد از دیوارهای جنوبی، منجر به صرفه‌جویی کلی ۸۰,۳ درصد در مصرف انرژی شدند(Tahersima et al., 2023).

جهانگیر و رشیدی (۱۴۰۱) پژوهشی با هدف محاسبه انرژی مصرفی و تلفات انرژی یک ساختمان آموزشی و ارائه راهکارهایی برای بهبود مصرف انرژی و کاهش آن انجام داده اند در این راستا، از ممیزی انرژی برای بررسی دقیق ساختمان و برآورد هزینه‌های آن استفاده شده و پیشنهادات کاهش مصرف انرژی با توجه به نقاط ضعف ساختمان ارائه شده است. برای شبیه‌سازی ساختمان از نرم‌افزار دیزاین بیلدر و برای محاسبات ممیزی انرژی از روابط موجود در دستورالعمل تعیین مصرف انرژی و برچسب انرژی سازمان ملی استاندارد استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین تلفات انرژی از در و پنجره و پل‌های حرارتی اتفاق می‌افتد و با اجرای سه راهکار ، توانستن مصرف انرژی را ۴۰٪ کاهش دهند و دمای آسایش را ۲۰ درجه تغییر دهند(Jahangir & Rashidi, 2022).

سلیمانی و همکارانش (۱۳۹۹) در تحقیقی که بر روی ساختمان‌های آموزشی دانشگاه شهید بهشتی انجام داده‌اند با شناسایی نارسایی‌های موجود و عملیاتی‌کردن راهکارهای بهینه‌سازی در راستا کاهش مصرف انرژی دریافتند که در دانشکده الهیات و علوم، بهینه‌سازی مصرف انرژی به ترتیب ٪۷۹ و ٪۲۷ تأثیر داشته و پنل‌های خورشیدی می‌توانند ٪۸ تا ٪۶۵ از نیاز برق دانشکده‌ها را تأمین کنند (Ahmadi Soleimani et al., 2020).

جدول ۱-بررسی پیشینه پژوهش های انجام شده

Table 1- Review of the Previous Studies

نویسنده	اقلیم	روش پژوهش	نوع ساختمان	اقدام انجام شده	تأثیر بر مصرف انرژی
Park et al. (2024)	معتدل (کره جنوبی)	با تشخیص عملکرد (اندازه‌گیری انتقال حرارتی، هوابندی، کیفیت هوای داخلی) و شبیه‌سازی.	آموزشی قدیمی	بازسازی مدرسه دهه ۱۹۳۰ با رعایت قوانین حفاظت از میراث فرهنگی	کاهش ۲۹ درصدی مصرف انرژی (از ۱۹۰,۷ به ۱۳۵,۱ کیلووات‌ساعت بر مترمربع)، بهبود انتقال حرارتی از ۱,۴۷ به ۰,۳۸ وات بر مترمربع کلوین، کاهش نشت هوا از ۶۰۶,۴ به ۱۱,۰

Islam, Safayet, & Al Mamun, (2024)	گرم مرطوب	شبیه‌سازی با Green Building Studio (GBS) ، Autodesk Revit	آموزشی	انتخاب مواد و اجزای مناسب در طراحی ساختمان	حداکثر صرفه‌جویی در انرژی CO2حدود ۳۲,۳۸٪ و کاهش تولیدی حدود ۲۸,۸۵٪
(Granados-López et al., 2023)	معتدل و مرطوب	شبیه‌سازی دیزاین بیلدر	مسکونی	بهبود طراحی برای افزایش نور داخلی و رعایت استانداردهای نوردهی سالانه	کاهش ۳۰-۵۰٪ در نیاز به نور مصنوعی و صرفه‌جویی ۲۰-۳۰٪ در مصرف انرژی کلی
(Gao et al., 2022)	سرد	شبیه‌سازی دیزاین بیلدر	آموزشی	تحلیل اثرات گرمایش متناوب و پیوسته- بررسی تأثیرات مختلف بر مصرف انرژی و انتشار کربن	افزایش ۵٪ در مساحت پنجره به دیوار باعث کاهش ۱۰,۸٪–۱۶,۲٪ در مصرف انرژی و انتشار کربن می‌شود.
(mr Sayed Hassan Abdallah2023)	گرم و خشک	شبیه‌سازی با نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر	مذهبی	جایگزینی واحدهای LEDروشنایی سنتی با و استفاده از حسگرهای هوشمند	صرفه‌جویی ۹٪ در مصرف انرژی کل و بهینه‌سازی مصرف انرژی
(Liu et al., 2021)	سرد	شبیه‌سازی رویت و دیزاین بیلدر	آموزشی	RF استفاده از مدل برای پیش‌بینی مصرف انرژی و ارزیابی اهمیت پارامترها	بهترین عملکرد را در RF مدل پیش‌بینی مصرف انرژی نسبت به دارد SVM و BP-ANN
(Soltaninejad et al., 2024)	گرم و خشک	نرمافزار ترنسیس	آموزشی	شبیه‌سازی سامانه فتوولتاییک-گرمایی برای تأمین انرژی گرمایشی	تأمین ۴۱/۱ مگاوات-ساعت انرژی حرارتی در ماه‌های سرد با کارایی بیش از ۵۰ درصد، تولید ۷۳ مگاوات-ساعت انرژی الکتریکی سالانه، کاهش بیش از ۵۳ تن آلاینده‌های هوا
(Boroughi & Baharlou-Horeh, 2023).	گرم و خشک	شبیه سازی دیزاین بیلدر و فلوئنت	آموزشی	مدل‌سازی بار سرمایی و گرمایی، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، تلفیق پیکربندی‌های مختلف، رتبه‌بندی حالت‌ها	۴۳,۸۶٪ صرفه‌جویی در مصرف گاز، ۱۱,۶۵٪ در مصرف برق، ۱۰,۵۶٪ کاهش هزینه برق ر موجب شد.
(Tahersima et al., 2023).	سرد و کوهستانی	نرم‌افزار تیسول۳ و نرم افزار دیزاین بیلدر	آموزشی	شبیه‌سازی و مدل‌سازی آبگرمکن‌های خورشیدی و سلول‌های فتوولتائیک بر روی ساختمان.	شامل صرفه‌جویی کلی ۸۰,۳ درصد، تأمین ۸۱,۳ درصد آب گرم، راندمان ۴۹,۹ درصد آبگرمکن خورشیدی، صرفه‌جویی ۲۶۷۰ مترمکعب گاز، و تأمین ۴۷ درصد و ۲۲,۳ درصد برق مصرفی از سلول‌های خورشیدی.
(Jahangir & Rashidi, 2022).	گرم خشک	شبیه‌سازی دیزاین بیلدر	آموزشی	- تعویض گاز داخل پنجره دوجداره و تغییر استفاده از آن به آرگون. درزگیر در محل اتصال احداث پنجره با دیواره و	با اجرای سه راهکار، توانستن مصرف انرژی را ۴۰٪ کاهش دهند و دمای آسایش را ۲۰ درجه تغییر دهند

				سایه‌بان افقی بالای در و پنجره	
(Ahmadi Soleimani et al., 2020)	گرم و خشک	شبیه‌سازی دیزاین بیلدر	آموزشی	ترکیب پیکربندی‌های مختلف پنجره، پرده، سیستم روشنایی و دماهای تنظیم، ارائه ۱۰ حالت بهینه و رتبه بندی آنها	٪۲۷ تا ٪۷۹ کاهش در مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی با پنل‌های خورشیدی تأمین ٪۸ تا ٪۶۵ از نیاز برق

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، از نوع کاربردی است؛ چراکه در پی ارائه راهکارهایی برای بهبود شرایط مصرف انرژی در ساختمان‌های آموزشی است. از نظر روش‌شناسی نیز مراحل مختلف این پژوهش بر اساس مطالعات میدانی و گردآوری اطلاعات به طور تجربی، شبیه‌سازی در نرم‌افزار و بهره‌گیری از مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. در ابتدا بر مبنای مطالعه میدانی، نقشه ساختمان، شرایط مصرف انرژی و نوع مصالح و اجزای به‌کاررفته در ساختمان مشخص می‌شود. با استفاده از فایل EPW در نرم‌افزار Climate Consultant اطلاعات اقلیمی منطقه و محدوده آسایش و شرایط بحرانی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی انرژی ساختمان از نرم‌افزار دیزاین - بیلدر استفاده شده است. دیزاین‌بیلدر از موتور مدل‌سازی انرژی پلاس بهره می‌برد. این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی مصرف انرژی را بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده فراهم می‌کند و به شناسایی نقاط ضعف و نارسایی‌های موجود در معماری مدارس کمک می‌کند. مراحل انجام تحقیق به‌صورت تصویر ۱ معرفی شده است که شامل ۳ مرحله اصلی است:

۱.برداشت چهار مدرسه منتخب و مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

۲.بررسی وضع موجود ساختمان‌ها و مقایسه با استانداردهای ملی و بین‌المللی

۳.اعمال راهکارها و ارزیابی مجدد



تصویر ۱-فرایند پژوهش

Figure 1- Research Process

۱.بستر پژوهش:

-اقلیم

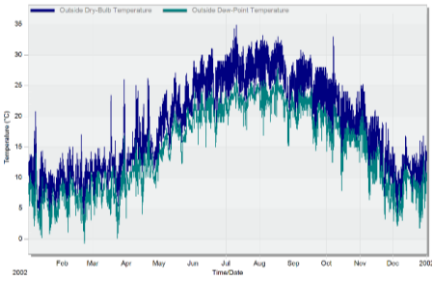
بابل شهری در شمال ایران و در استان مازندران است این منطقه دارای اقلیم معتدل و مرطوب است. دمای متوسط سالانه بابل حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. در تابستان‌ها دمای متوسط حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در زمستان‌ها حدود ۵ درجه سانتی‌گراد است .میزان بارندگی سالانه در بابل حدود ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر است که

بیشتر در فصول پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد. میانگین رطوبت سالانه نیز حدود ۷۰٪ تا ۸۰٪ است. دمای میانگین روز درجه سرمایشی و گرمایشی سالانه بر اساس استانداردهای اقلیمی محلی تعیین می‌شود. دمای میانگین بابل در تابستان و زمستان نسبت به مناطق مرکزی ایران خنک‌تر است و رطوبت بابل نسبت به بسیاری از شهرهای داخلی ایران بالاتر است .

جدول ۲- داده های آب وهوای شهر بابل (ماخذ نرم افزار Climate Consultant)

Table 2- Climate Data of Babol City (Source: Climate Consultant Software)

پارامتر	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	واحد
تابش کلی افقی (میانگین ساعتی)	334	392	421	408	409	357	301	223	182	205	246	285	Wh/sq.m
تابش مستقیم نرمال (میانگین ساعتی)	404	398	414	405	400	402	384	373	349	359	381	384	Wh/sq.m
تابش پراکنده (میانگین ساعتی)	90	128	155	143	152	129	112	74	55	68	74	76	Wh/sq.m
تابش کلی افقی (حداکثر ساعتی)	597	693	738	719	726	642	547	404	313	373	452	525	Wh/sq.m
تابش مستقیم نرمال (حداکثر ساعتی)	479	494	494	493	608	483	465	438	416	433	455	467	Wh/sq.m
تابش پراکنده (حداکثر ساعتی)	157	220	264	244	269	221	194	132	97	123	133	134	Wh/sq.m
تابش کلی افقی (مجموع روزانه)	4337	5479	6091	5800	5467	4375	3324	2252	1741	2014	2609	3369	Wh/sq.m
تابش مستقیم نرمال (مجموع روزانه)	5238	5571	5982	5758	5334	4921	4234	3752	3342	3521	4041	4544	Wh/sq.m
تابش پراکنده (مجموع روزانه)	1175	1796	2239	2034	2038	1582	1243	753	526	671	791	901	Wh/sq.m
روشنایی کلی افقی (میانگین ساعتی)	37798	44323	47670	46178	46311	40435	34069	25315	20602	23206	27813	32229	lux
روشنایی مستقیم نرمال (میانگین ساعتی)	45696	45060	46817	45832	45236	45489	43446	42213	39555	40576	43117	43507	lux
دمای خشک (میانگین ماهانه)	13	19	23	24	27	24	19	12	8	7	8	10	degrees C
دمای نقطه شبنم (میانگین ماهانه)	11	15	19	21	22	20	16	10	5	5	6	7	degrees C
رطوبت نسبی (میانگین ماهانه)	85	81	79	80	78	77	85	88	81	85	85	85	percent
جهت باد (حالت ماهانه)	0	0	0	180	180	0	30	180	160	70	30	0	degrees
سرعت باد (میانگین ماهانه)	2	2	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	m/s
دمای زمین (میانگین ماهانه، 3 عمق)	11	15	18	21	22	22	20	17	13	11	10	10	degrees C



تصویر۲-نمودار تغییرات دما

Figure 2- Temperature Variation Diagram



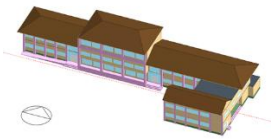
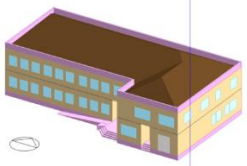
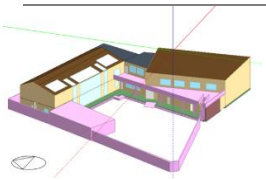
تصویر۳-نمودار جهت باد

Figure 3- Wind Direction Diagram

در این پژوهش، مدارس نوساز شهر بابل در استان مازندران، با اقلیم معتدل و مرطوب، موردبررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. معیار انتخاب این مدارس، تازه‌ساز بودن آن‌ها و ساخت در فاصله زمانی کمتر از ۵ سال است؛ براین‌اساس، سه مدرسه که در این مدت ساخته و افتتاح شده‌اند: مدرسه نوشیروانی، مدرسه شکوه و مدرسه بنیاد برکت انتخاب شده اند و همچنین، مدرسه شهرابی به عنوان نمونه‌ای در حال ساخت که قرار است در آینده نزدیک افتتاح شود، در این مطالعه گنجانده شده است. هدف از شبیه‌سازی این مدارس، ارزیابی عملکرد مصرف انرژی آن‌ها است تا پتانسیل‌های بهبود و بهره‌وری در مصرف انرژی مشخص شود. این بررسی‌ها به درک بهتر چالش‌ها و فرصت‌های موجود در مدیریت مصرف انرژی در فضاهای آموزشی منطقه کمک می‌کند و می‌تواند راهکارهایی پایدار و موثر برای طراحی آینده مدارس ارائه دهد. در جدول ۳ هر یک از مدارس مشاهده می‌گردد.

جدول ۳-نمونه های مطالعاتی مورد نظر

Table 3- Selected Case Studies

مدرسه شکوه بابل	مدرسه نوشیروانی بابل	مدرسه برکت بابل	مدرسه شهرابی بابل
			
			

جدول ۴- اطلاعات زیر بنایی نمونه های مطالعاتی مورد نظر

Table 4- Basic Information of the Selected Case Studies

نام ساختمان	زیربنای کل	زیربنای تهویه شده	مساحت سقف	مساحت شیشه دیوارها	مساحت شیشه سقفی	مساحت دیوارها	حجم فضاها
مدرسه برکت	۱۱۵۰	۱۰۹۶	۷۳۰	۱۹۲	۰	۱۰۶۷	۴۴۰۰
مدرسه شکوه	۱۲۴۵	۱۲۳۱	۷۴۵	۱۱۶	۰	۱۱۳۷	۵۳۰۰
مدرسه نوشیروانی	۱۸۸۰	۱۸۳۶	۱۳۸۶	۳۶۹	۰	۱۹۷۴	۷۱۰۰
مدرسه شهرابی	۱۷۰۵	۱۴۵۰	۱۱۵۶	۲۰۷	۹۷	۱۶۹۷	۸۱۰۰

۲.فرآیند شبیه سازی

-فرضیات شبیه‌سازی:

❖در این ساختمان جدار دیوار که از بتن سبک و نما و پوشش داخلی تشکیل شده بر اساس نتایج نرم‌افزار دارای ضریب انتقال حرارت برابر ۰٫۷ w/m^2k است.

❖در این ساختمان جدار سقف از بتن تشکیل شده است بر اساس نتایج نرم‌افزار دارای ضریب انتقال حرارت برابر ۱.۱ w/m^2k است.

❖سیستم سرمایش ساختمان کولرگازی است.

❖سیستم گرمایش ساختمان پکیج و شوفاژ با راندمان ۸۵ درصد می باشد.

❖ساختمان دارای هوای تازه از نوع مکانیکی نمی‌باشد.

❖روشنایی ساختمان نیز از نوع LED با توان ۷٫۵ وات در هر متر مربع در نظر گرفته شده است.

❖توان تجهیزات ساختمان برابر ۴ وات در هر متر مربع در نظر گرفته شده است.

❖ست‌پوینت سرمایش ۲۴ و ست پوینت گرمایش ۲۲ در نظر گرفته شده است.

❖تعداد افراد برابر ۰٫۲ نفر در هر متر مربع فرض شده است.

❖پنجره ساختمان دوجداره با فریم UPVC است.

❖بر اساس بازدید میدانی ، فعالیت‌های آموزشی و فوق‌برنامه در تمام طول سال (از جمله تابستان) ادامه دارد؛ ازاین‌رو برنامه اشغال برای تمام ماه‌ها به‌صورت حضور کامل کاربران لحاظ شده است تا شرایط اوج بار به‌درستی شبیه‌سازی شود.

جدول ۵-مشخصات پنجره

Table 5- Window Specifications

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0.596
Direct solar transmission	0.487
Visible transmittance	0.541
U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m2-K)	2.679
U-Value (W/m2-K)	2.537

تجزیه و تحلیل داده‌ها

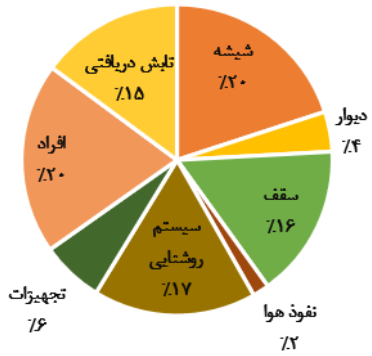
۱-بررسی وضعیت حالت اولیه

مصرف انرژی مدرسه برکت مطابق جدول زیر است که شاخص مصرف انرژی کل ساختمان ۶۳,۵ kWh/m^2 است.

جدول ۶-نتایج شبیه سازی مدرسه برکت

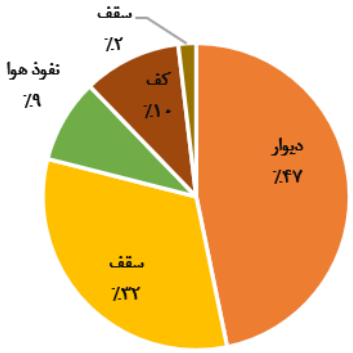
Table 6- Simulation Results of Barakat School

ماه	تجهیزات برقی	روشنایی	گرمایش	سرمایش	آب گرم مصرفی	کل برق مصرفی	کل گاز مصرفی	کل انرژی مصرفی
Jan	635	1,651	5,646	-	426	2,286	6,072	8,358
Feb	557	1,456	4,438	-	400	2,014	4,837	6,851
Mar	614	1,606	2,623	-	373	2,220	2,996	5,216
Apr	588	1,541	544	242	533	2,371	1,077	3,448
May	635	1,651	-	1,639	533	3,926	533	4,459
Jun	588	1,541	-	3,102	506	5,231	506	5,738
Jul	614	1,606	-	4,194	426	6,414	426	6,840
Aug	635	1,651	-	4,273	426	6,559	426	6,986
Sep	568	1,495	-	2,724	533	4,788	533	5,320
Oct	635	1,651	-	1,928	426	4,214	426	4,640
Nov	609	1,586	1,159	458	586	2,653	1,745	4,398
Dec	594	1,560	3,996	-	426	2,154	4,423	6,577
Annual	7,272	18,998	18,406	18,561	5,595	44,831	24,001	68,832



تصویر ۴-عوامل پرت حرارتی در تابستان مدرسه برکت

Figure 4- Thermal loss factors in summer, Barakat School



تصویر ۵-عوامل پرت حرارتی در زمستان مدرسه برکت

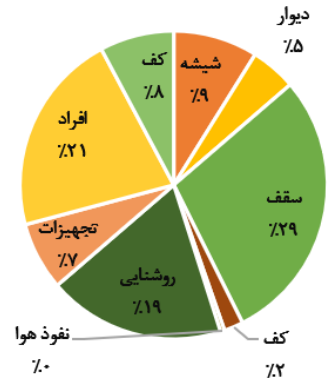
Figure 5- Thermal loss factors in winter, Barakat School

مصرف انرژی مدرسه شکوه مطابق جدول زیر می باشد که شاخص مصرف انرژی کل ساختمان ۶۶kWh/m^2 می باشد.

جدول ۷-نتایج شبیه سازی مدرسه شکوه

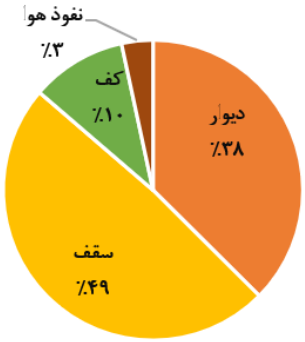
Table 7- Simulation Results of Shokouh School

ماه	تجهیزات برقی	روشنایی	گرمایش	سرمایش	آب گرم مصرفی	کل برق مصرفی	کل گاز مصرفی	کل انرژی مصرفی
Jan	730	1,899	8,276	-	243	2,629	8,519	11,148
Feb	641	1,675	6,442	-	214	2,316	6,656	8,972
Mar	706	1,847	3,815	-	255	2,553	4,070	6,623
Apr	677	1,772	872	227	243	2,675	1,115	3,790
May	730	1,899	-	1,949	236	4,578	236	4,813
Jun	677	1,772	-	3,694	257	6,142	257	6,400
Jul	706	1,847	-	5,103	295	7,656	295	7,951
Aug	730	1,899	-	4,936	295	7,565	295	7,861
Sep	653	1,720	-	2,925	292	5,298	292	5,590
Oct	730	1,899	-	1,886	225	4,515	225	4,740
Nov	700	1,824	1,969	361	236	2,886	2,205	5,091
Dec	683	1,794	6,144	-	266	2,477	6,410	8,887
Annual	8,362	21,846	27,518	21,081	3,059	51,289	30,577	81,865



تصویر ۶-عوامل پرت حرارتی در تابستان مدرسه شکوه

Figure 6- Thermal loss factors in summer, Shokouh School



تصویر ۷-عوامل پرت حرارتی در زمستان مدرسه شکوه

Figure 7- Thermal loss factors in winter, Shokouh School

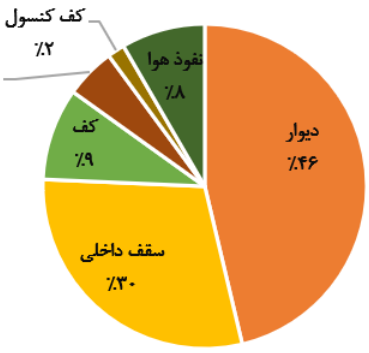
مدل شبیه سازی مدرسه نوشیروانی می

جدول ۸-نتایج شبیه سازی مدرسه نوشیروانی

Table 8- Simulation Results of Noshirvani School

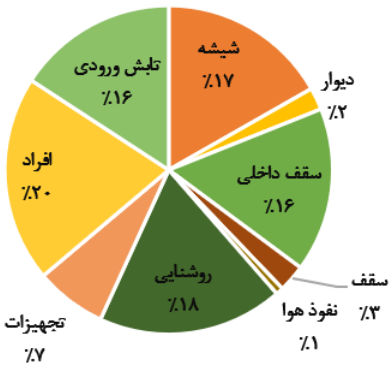
ماه	تجهیزات برقی	روشنایی	گرمایش	سرمایش	آب گرم مصرفی	کل برق مصرفی	کل گاز مصرفی	کل انرژی مصرفی
Jan	1,075	2,822	9,345	-	362	3,898	9,707	13,604
Feb	944	2,492	7,212	-	320	3,436	7,532	10,968
Mar	1,041	2,738	4,798	-	378	3,778	5,176	8,954
Apr	997	2,635	1,264	218	362	3,850	1,626	5,475
May	1,075	2,825	-	2,259	352	6,159	352	6,511
Jun	997	2,620	-	4,749	381	8,366	381	8,747
Jul	1,041	2,721	-	6,739	435	10,501	435	10,936

Aug	1,075	2,798	-	6,665	435	10,538	435	10,973
Sep	962	2,539	-	4,199	431	7,700	431	8,131
Oct	1,075	2,823	-	3,113	336	7,012	336	7,348
Nov	1,032	2,715	1,825	877	352	4,623	2,177	6,800
Dec	1,006	2,652	6,262	-	393	3,658	6,655	10,313
Annual	12,320	32,379	30,705	28,820	4,538	73,519	35,243	108,762



تصویر ۸-عوامل پرت حرارتی در زمستان مدرسه نوشیروانی

Figure 8- Thermal loss factors in winter, Noshirvani School



تصویر۹-عوامل پرت حرارتی در تابستان مدرسه نوشیروانی

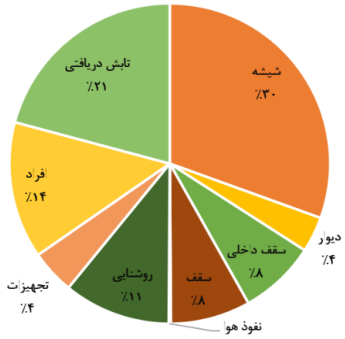
Figure 9- Thermal loss factors in summer, Noshirvani School

مصرف انرژی مدرسه شهرابی مطابق جدول زیر بوده که شاخص مصرف انرژی کل ساختمان ۶۰kWh/m^2 می باشد.

جدول ۹-نتایج شبیه سازی ساختمان شهرابی

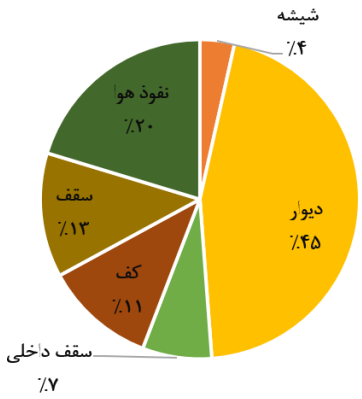
Table 9- Simulation Results of Shahrabi Building

ماه	تجهیزات برقی	روشنایی	گرمایش	سرمایش	آب گرم مصرفی	کل برق مصرفی	کل گاز مصرفی	کل انرژی مصرفی
Jan	784	1,895	8,248	-	285	2,679	8,532	11,211
Feb	689	1,668	6,334	-	251	2,357	6,585	8,942
Mar	759	1,838	3,599	-	299	2,598	3,897	6,495
Apr	728	1,763	837	835	285	3,326	1,122	4,447
May	784	1,895	-	3,384	276	6,062	276	6,339
Jun	728	1,763	-	4,453	301	6,943	301	7,244
Jul	759	1,838	-	5,631	346	8,228	346	8,574
Aug	784	1,895	-	6,494	346	9,173	346	9,519
Sep	703	1,706	-	3,842	342	6,251	342	6,593
Oct	784	1,895	-	2,323	264	5,002	264	5,265
Nov	752	1,819	1,738	655	276	3,226	2,014	5,240
Dec	735	1,782	5,345	-	311	2,517	5,656	8,173
Annual	8,989	21,757	26,101	27,616	3,581	58,361	29,682	88,043



تصویر۱۰-عوامل پرت حرارتی در تابستان در مدرسه شهرابی

Figure 10- Thermal loss factors in summer, Shahrabi School



تصویر ۱۱-عوامل پرت حرارتی در زمستان در مدرسه شهرابی

Figure 11- Thermal loss factors in winter, Shahrabi School

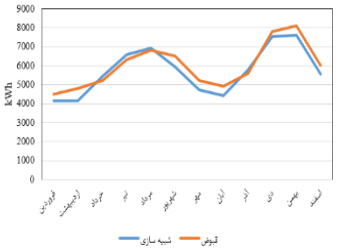
۲-اعتبار سنجی

ابتدا نتایج شبیه سازی بر اساس سوابق قبوض برق و گاز مورد اعتبار سنجی قرار گرفت و نتایج به قبوض ساختمان نزدیک گردید.



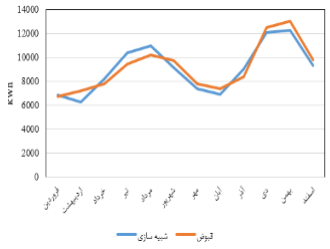
تصویر ۱۲-اعتبارسنجی نتایج مدرسه شکوه با قبض برق و گاز

Figure 12- Validation of simulation results for Shokouh School against electricity and gas bills



تصویر ۱۳-اعتبارسنجی نتایج مدرسه بنیاد برکت با قبض برق و گاز

Figure 13- Validation of simulation results for Bonyad-e-Barekat School against electricity and gas bills



تصویر ۱۴-اعتبارسنجی نتایج مدرسه نوشیروانی با قبض برق و گاز

Figure 14- Validation of simulation results for Noshirvani School against electricity and gas bills

و بنیاد برکت با استفاده از داده‌های واقعی قبوض برق و گاز شبیه‌سازی شدند. در این فرایند، پارامترهای ورودی کلیدی از جمله عملکرد سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، برنامه‌ی حضور افراد، الگوی مصرف تجهیزات و نرخ نفوذ هوا در محدوده‌های واقع‌گرایانه تنظیم شد تا اختلاف بین مصرف شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده‌ی ماهانه به حداقل برسد.نمودارهای مقایسه‌ای مصرف انرژی ماهانه‌ی شبیه‌سازی‌شده با قبوض واقعی برای هر سه مدرسه، همخوانی قابل‌قبولی را نشان می‌دهند. روند کلی تغییرات ماهانه‌ی مصرف در مدل‌ها با داده‌های واقعی مطابقت دارد و الگوی فصلی مصرف به‌خوبی توسط مدل‌ها بازتولید شده است. ضریب تعیین R^2 محاسبه‌شده برای مدل‌ها بالاتر از ۰,۹۰ است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی قوی بین پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های واقعی می‌باشد.

- **تحلیل خطای کمّی**

برای سنجش کمی دقت مدل، شاخص‌های آماری RMSE ، CV(RMSE) و MAPE محاسبه شدند . RMSE میانگین اندازه‌ی خطا را بر حسب کیلووات‌ساعت نشان می‌دهد و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - A_i)^2}$$

که در آن S_iمقدار شبیه‌سازی‌شده، A_iمقدار واقعی و nتعداد ماه‌ها است.

ضریب تغییرات ریشه‌ی میانگین مربعات خطا از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{A}} \times 100$$

همچنین میانگین درصد خطای مطلق از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{S_i - A_i}{A_i}\right| \times 100$$

جدول ۱۰. خلاصه نتایج کالیبراسیون را برای سه مدرسه شکوه، نوشیروانی وبنیاد برکت

Table 10. Summary of calibration results for the three schools: Shokouh, Noshirvani, and Boniyad Barakat.

مدرسه	تعداد ماه‌ها (n)	RMSE (کیلووات‌ساعت)	CV(RMSE) (%)	MAPE (%)	R^2
بنیاد برکت	12	325.4	8.7%	6.9%	0.93
شکوه	12	412.8	9.2%	7.4%	0.91
نوشیروانی	12	489.6	8.1%	6.5%	0.94

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر خطا برای مدل‌های سه مدرسه در محدوده‌ی قابل‌قبول قرار دارند. به‌طور کلی، مقادیر CV(RMSE) کمتر از ۱۵ درصد برای کالیبراسیون ماهانه، مطابق با ASHRAE Guideline 14 ، و نیز در محدوده‌ی قابل‌قبول IPMVP هستند. همچنین ضریب تعیین بالاتر از ۰,۹۰ نشان‌دهنده‌ی تطابق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی است. بنابراین، مدل‌های توسعه‌یافته از دقت کافی برای تحلیل مصرف انرژی و ارزیابی راهکارهای بهینه‌سازی برخوردارند.

•اعتبارسنجی مدرسه‌ی شهرابی (در حال ساخت)

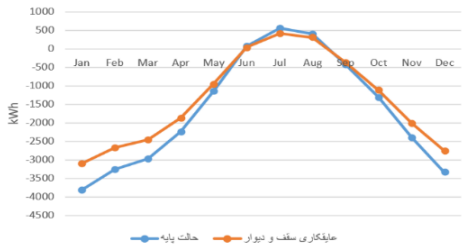
از آنجا که مدرسه‌ی شهرابی در زمان انجام پژوهش هنوز در مرحله‌ی ساخت قرار داشت، داده‌های واقعی مصرف انرژی برای اعتبارسنجی مستقیم مدل در دسترس نبود. بنابراین، به‌جای اعتبارسنجی مبتنی بر داده‌های بهره‌برداری، از رویکرد مدل مرجع بر اساس ضوابط مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲-۱۴۲-۱۴۰۰ سازمان ملی استاندارد ایران استفاده شد و پارامترهای ورودی بر مبنای مقادیر مجاز این ضوابط تعریف گردیدند. همچنین، به‌منظور ارزیابی اثر عدم‌قطعیت پارامترها، تحلیل حساسیت انجام شد که نتایج آن نشان داد تغییرات مصرف کل انرژی سالانه در محدوده‌ای کمتر از ±۴,۵٪ باقی می‌ماند.بر این اساس، نتایج مربوط به مدرسه‌ی شهرابی باید به‌عنوان پیش‌بینی طراحی تفسیر شوند، نه اعتبارسنجی تجربی. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود پس از بهره‌برداری و فراهم شدن داده‌های واقعی مصرف، مدل مجدداً بازبینی و ارزیابی شود. این موضوع یکی از محدودیت‌های پژوهش محسوب می‌شود.

۳- راهکار های بهینه سازی

-راهکار عایقکاری سقف و دیوار

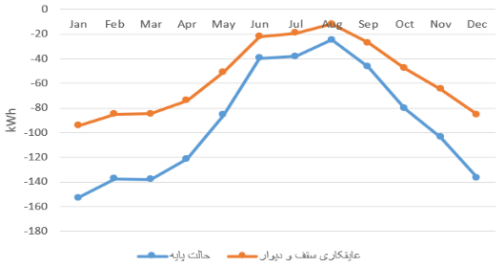
در راهکار عایق‌کاری، برای سقف و دیوار از ۳ سانتی متر عایق پلی استایرن استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت دیوار از ۰,۷ به ۰,۴۸ w/m^2k و ضریب انتقال حرارت سقف از ۱,۱ به ۰,۶ w/m^2k کاهش یافته است. در ادامه نتایج شبیه سازی برای هر ۴ مدرسه در حالت عایقکاری قرار گرفته است. در مدرسه برکت با عایق‌کاری انتقال حرارت

از دیوار ۱۸ درصد، انتقال حرارت از سقف ۳۵ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۲ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.



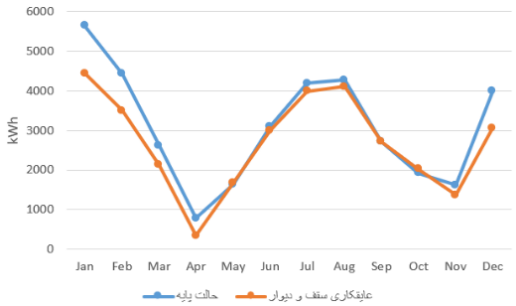
تصویر ۱۵-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی دیوار در مدرسه برکت

Figure 15- Impact of insulation on wall thermal loss in Barakat School



تصویر ۱۶-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی سقف در مدرسه برکت

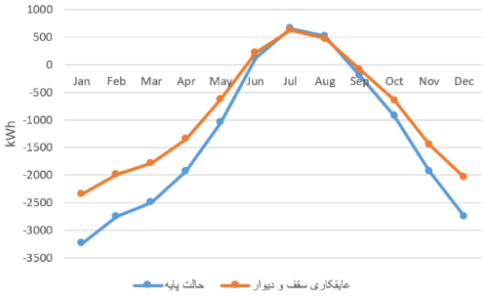
Figure 16- Impact of insulation on roof thermal loss in Barakat School



تصویر ۱۷-تاثیر عایقکاری بر کاهش مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش مدرسه برکت

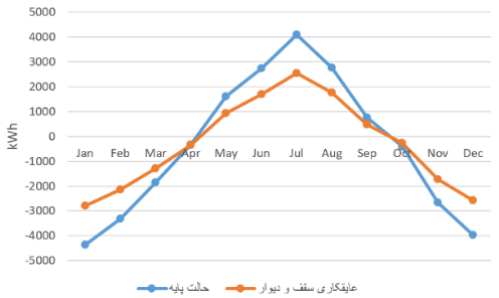
Figure 17- Impact of insulation on total heating and cooling energy reduction in Barakat School

در مدرسه شکوه با عایقکاری انتقال حرارت از دیوار ۲۳. درصد، انتقال حرارت از سقف ۳۵٫۸ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۲۰٫۷ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.



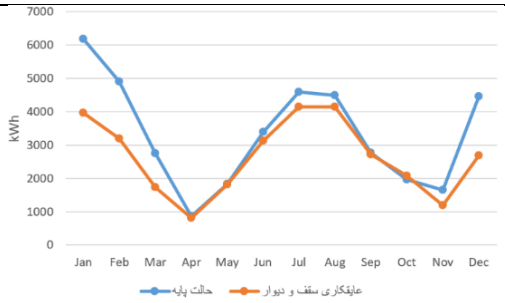
تصویر ۱۸-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی دیوار در مدرسه شکوه

Figure 18- Impact of insulation on wall thermal loss in Shokouh School



تصویر ۱۹-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی سقف در مدرسه شکوه

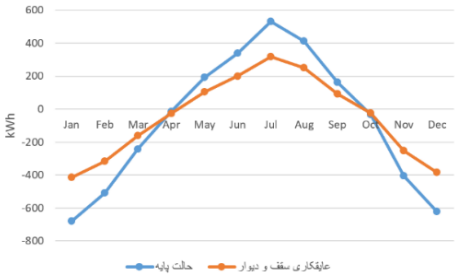
Figure 19- Impact of insulation on roof thermal loss in Shokouh School



تصویر ۲۰-تاثیر عایقکاری بر مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش مدرسه شکوه

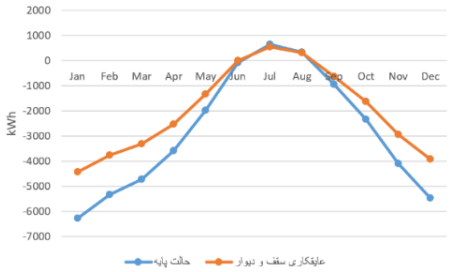
Figure 20- Impact of insulation on total heating and cooling energy in Shokouh School

در مدرسه نوشیروانی با عایقکاری انتقال حرارت از دیوار ۲۸ درصد، انتقال حرارت از سقف ۳۹ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۳ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است .



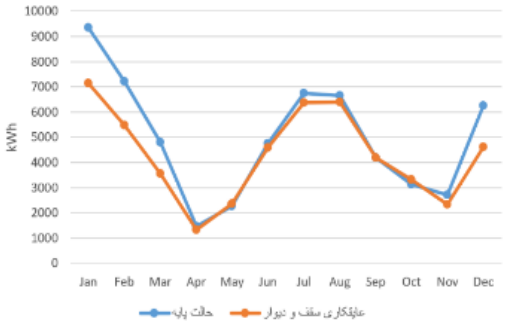
تصویر ۲۱-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی دیوار در مدرسه نوشیروانی

Figure 21- Impact of insulation on wall thermal loss in Noshirvani School



تصویر ۲۲-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی سقف در مدرسه نوشیروانی

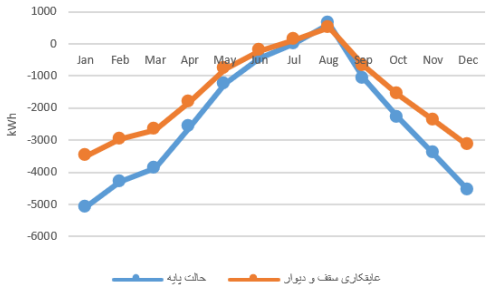
Figure 22- Impact of insulation on roof thermal loss in Noshirvani School



تصویر ۲۳-تاثیر عایقکاری بر کاهش مصرف انرژی مدرسه نوشیروانی

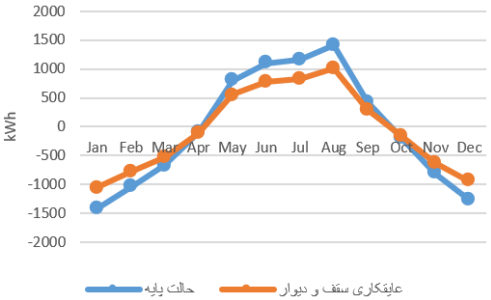
Figure 23- Impact of insulation on energy consumption reduction in Noshirvani School

مدرسه شهرابی با عایقکاری انتقال حرارت از دیوار ۲۹ درصد، انتقال حرارت از سقف ۲۷ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۱ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است .



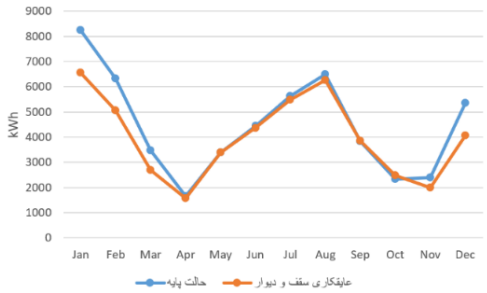
تصویر ۲۴-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی دیوار در مدرسه شهرابی

Figure 24- Impact of insulation on wall thermal loss in Shahrabi School



تصویر ۲۵-تاثیر عایقکاری بر تلفات حرارتی سقف در مدرسه شهرابی

Figure 25- Impact of insulation on roof thermal loss in Shahrabi School



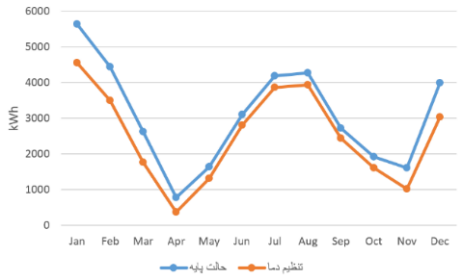
تصویر ۲۶-تاثیر عایقکاری بر کاهش مصرف انرژی مدرسه شهرابی

Figure 26- Impact of insulation on energy consumption reduction in Shahrabi School

-راهکار تنظیم دما

در راهکار تنظیم دما، دمای سیستم سرمایش از ۲۴ به ۲۵ درجه سانتی گراد و دمای سیستم گرمایش از ۲۲ به ۲۱ درجه سانتی گراد کاهش یافته است. در ادامه نتایج شبیه سازی برای هر ۴ مدرسه در حالت تنظیم دما قرار گرفته است.

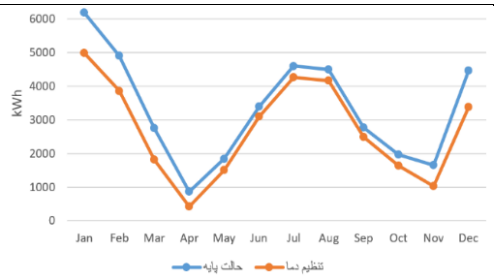
مدرسه برکت با تنظیم دما انرژی سیستم گرمایش ۲۵ درصد، انرژی سیستم گرمایش ۱۱ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۸ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.



تصویر ۲۷-تاثیر تنظیم دما بر مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش مدرسه برکت

Figure 27- Impact of temperature setpoint adjustment on total HVAC energy in Barakat School

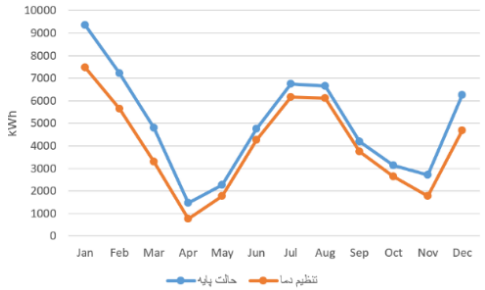
مدرسه شکوه با تنظیم دما ۲۵ انرژی سیستم گرمایش درصد، انرژی سیستم گرمایش ۱۱. درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۸,۲ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.



تصویر ۲۸-تاثیر تنظیم دما بر مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش مدرسه شکوه

Figure 28- Impact of temperature setpoint adjustment on total HVAC energy in Shokouh School

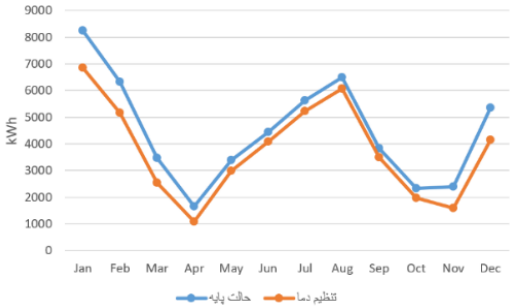
مدرسه نوشیروانی با تنظیم دما ۲۵ انرژی سیستم گرمایش درصد، انرژی سیستم گرمایش ۱۲ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۹ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.



تصویر ۲۹-تأثیر تنظیم دما بر کاهش مصرف انرژی مدرسه نوشیروانی

Figure 29- Impact of temperature setpoint adjustment on energy consumption reduction in Noshirvani School

مدرسه شهرابی با تنظیم دما ۲۲ انرژی سیستم گرمایش درصد، انرژی سیستم گرمایش ۹ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۱۶ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است.

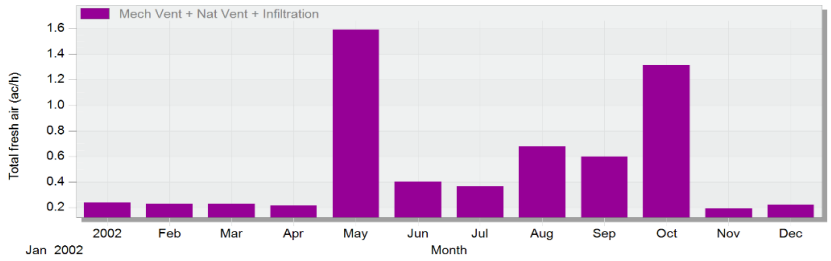


تصویر ۳۰- تأثیر تنظیم دما بر کاهش مصرف انرژی مدرسه شهرابی

Figure 30- Impact of temperature setpoint adjustment on energy consumption reduction in Shahrabi School

-راهکار تهویه طبیعی

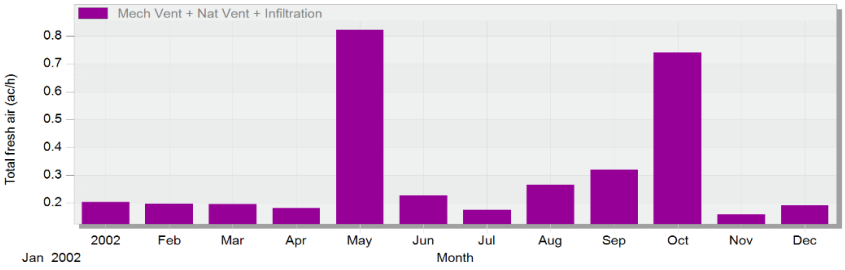
در راهکار تهویه طبیعی، پنجره‌ها قابلیت ۵۰ درصد بازشو داشته و در صورتی که دمای هوای بیرون از دمای هوای داخل در فصول گرم و معتدل کمتر باشد، پنجره ها باز شده و تهویه برقرار می گردد. در ادامه نتایج شبیه سازی برای هر ۴ مدرسه در حالت تهویه طبیعی قرار گرفته است.در مدرسه برکت با تهویه طبیعی انرژی سیستم سرمایش ۸ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۴ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی در فصول گرم و معتدل و همچنین نفوذ هوا در تمام سال مطابق شکل زیر می باشد.



تصویر ۳۱-تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی و نفوذ ناخواسته هوا مدرسه برکت

Figure 31- Air change rate from natural ventilation and unwanted infiltration in Barakat School

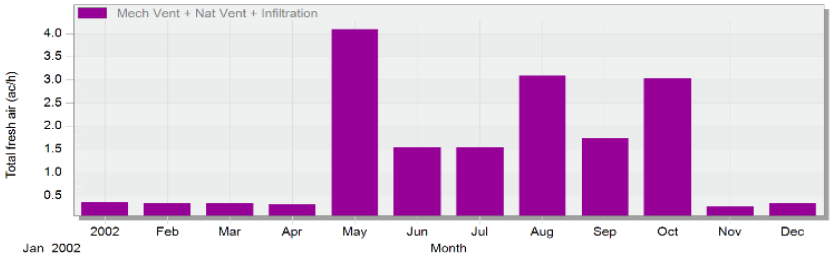
نتایج شبیه سازی برای تهویه طبیعی در مدرسه شکوه قرار گرفته است. با تهویه طبیعی انرژی سیستم سرمایش ۴. درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۲,۲ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی (از May تا October) در فصول گرم و معتدل و همچنین نفوذ هوا در تمام سال مطابق شکل زیر می باشد.



تصویر ۳۲-تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی و نفوذ ناخواسته هوا مدرسه شکوه

Figure 32- Air change rate from natural ventilation and unwanted infiltration in Shokouh School

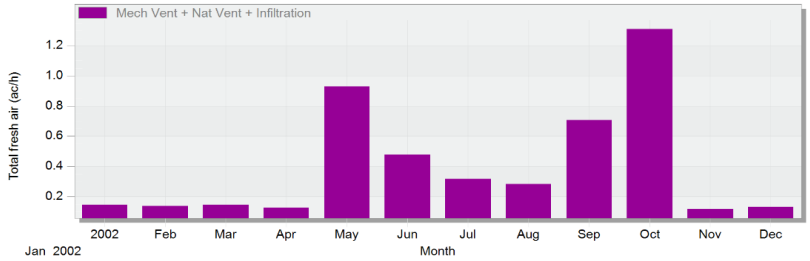
باتوجه‌به نتایج شبیه‌سازی برای تهویه طبیعی در مدرسه نوشیروانی با تهویه طبیعی انرژی سیستم سرمایش ۱۰ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۵ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی (از May تا October) در فصول گرم و معتدل و همچنین نفوذ هوا در تمام سال مطابق شکل زیر می باشد.



تصویر ۳۳-تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی و نفوذ ناخواسته هوا مدرسه نوشیروانی

Figure 33- Air change rate from natural ventilation and unwanted infiltration in Noshirvani School

در مدرسه شهید شهرابی با تهویه طبیعی انرژی سیستم سرمایش ۱۰ درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۵ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی (از May تا October) در فصول گرم و معتدل و همچنین نفوذ هوا در تمام سال مطابق شکل زیر می باشد.



تصویر ۳۴-تعداد تعویض هوا بر اساس تهویه طبیعی و نفوذ ناخواسته هوا مدرسه شهرابی

Figure 34- Air change rate due to natural ventilation and unintended infiltration in Shahrabi School

-راهکار پنجره دوجداره کم گسیل

در راهکار استفاده از پنجره دو جدار کم گسیل، انتقال حرارت از جدار شیشه و تابش دریافتی کاهش خواهد یافت و باتوجه‌به سطوح شیشه‌ای ساختمان، تأثیر آن بر انرژی سیستم سرمایش و گرمایش متفاوت خواهد بود.

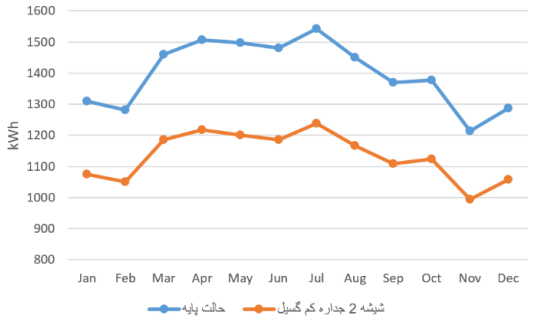
جدول ۱۱.مشخصات پنجره دوجداره کم گسیل

Table11- Specifications of Low-E Double-Glazed Window

Outermost pane	
Pane type	Generic LoE CLEAR 6MM
Flip layer	
Window gas 1	
Window gas type	ARGON 13MM
Innermost pane	
Pane type	Generic CLEAR 6MM

Calculated Values	
Total solar transmission (SHGC)	0.568
Direct solar transmission	0.474
Visible transmittance	0.745
U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m2-K)	1.357
U-Value (W/m2-K)	**1.493**

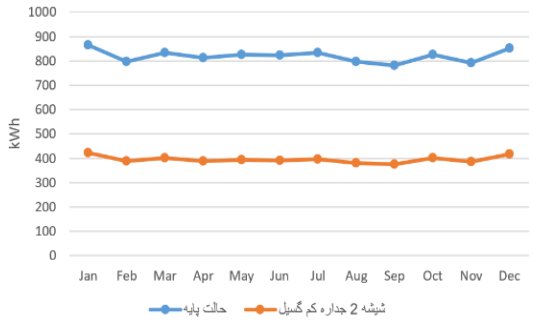
مدرسه برکت با ایجاد تغییر در پنجره و ایجادشیشه کم گسیل سیستم گرمایش ۱۰ درصد، انرژی سیستم سرمایش صفر درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش ۵ درصد نسبت به حالت پایه کاهش یافته است. با استفاده از شیشه کم گسیل، تابش دریافتی مطابق شکل زیر کاهش یافته است.



تصویر ۳۵-تابش دریافتی مدرسه برکت

Figure 35- Incident solar radiation on windows in Barakat School

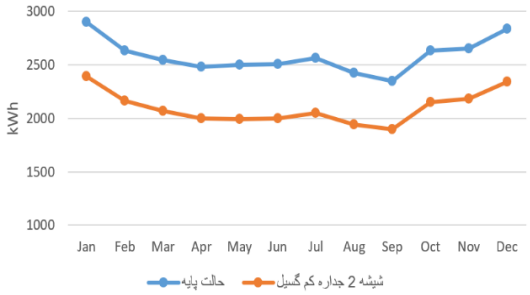
مدرسه شکوه در این حالت انرژی سیستم گرمایش ۳,۹ درصد افزایش، انرژی سیستم سرمایش ۳,۹ درصد کاهش یافته و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش نسبت به حالت پایه بدون تغییر ماند. این رفتار می تواند ناشی از کاهش همزمان ضریب انتقال حرارت و ضریب کسب حرارت خورشیدی در شیشه کم‌گسیل باشد.



تصویر ۳۶-تابش دریافتی مدرسه شکوه

Figure 36- Incident solar radiation on windows in Shokouh School

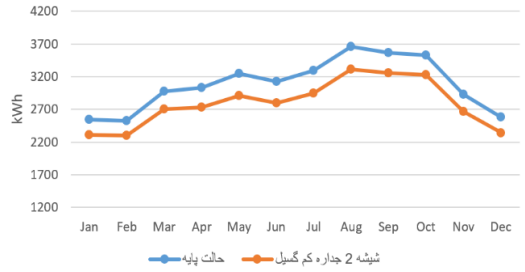
مدرسه نوشیروانی در این حالت انرژی سیستم گرمایش ۷ درصد ، انرژی سیستم سرمایش صفر درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش نسبت به حالت پایه ۴ درصد کاهش یافته است. با استفاده از شیشه کم گسیل، تابش دریافتی مطابق شکل زیر کاهش یافته است.



تصویر ۳۷-تابش دریافتی مدرسه نوشیروانی

Figure 37- Incident solar radiation on windows in Noshirvani School

مدرسه شهرابی در این حالت انرژی سیستم گرمایش ۵ درصد ، انرژی سیستم سرمایش صفر درصد و مجموع انرژی سیستم سرمایش و گرمایش نسبت به حالت پایه ۲ درصد کاهش یافته است. با استفاده از شیشه کم گسیل، تابش دریافتی مطابق شکل زیر کاهش یافته است.



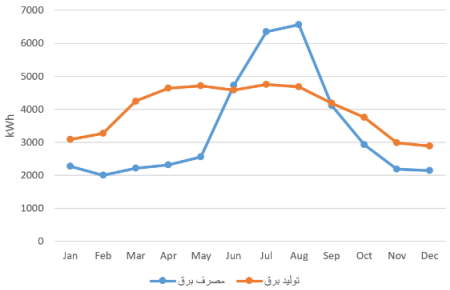
تصویر ۳۸- تابش دریافتی مدرسه شهرابی

Figure 38- Incident solar radiation on windows in Shahrabi School

- استفاده از پنل خورشیدی

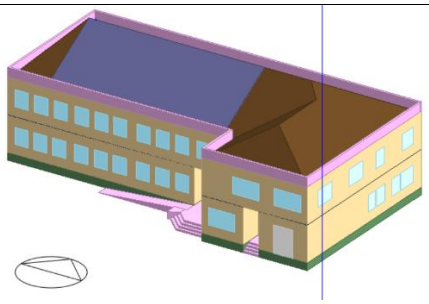
در این راهکار از ۱۶۰ متر مربع پنل خورشیدی با راندمان ۱۹ درصد با ظرفیت حدود ۳۰ کیلووات برای تولید برق خورشیدی استفاده شده است. در ادامه نتایج شبیه سازی برای هر ۴ مدرسه قرار گرفته است.

در حالت بهینه با استفاده از نیروگاه خورشیدی کل تولید برق در مدرسه برکت برابر ۴۷۷۵۰ کیلووات ساعت و کل مصرف برق مدرسه برابر ۴۰۳۳۸ کیلووات ساعت می باشد.



تصویر ۳۹-میزان تولید برق در مدرسه برکت

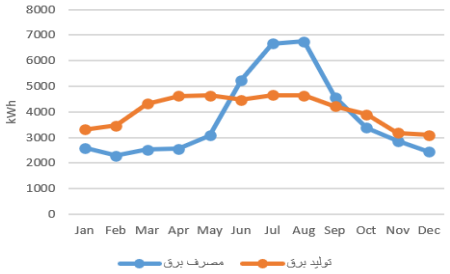
Figure 39- Solar electricity generation in Barakat School



تصویر ۴۰-قرارگیری نیروگاه در پشت بام مدرسه برکت

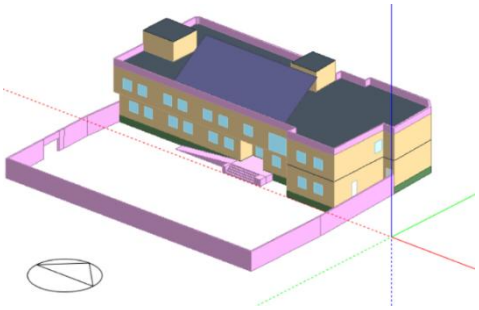
Figure 40- Solar power plant placement on the roof of Barakat School

در ادامه با استفاده از نیروگاه خورشیدی کل تولید برق در مدرسه شکوه برابر ۴۸۵۲۱ کیلووات ساعت و کل مصرف برق مدرسه برابر ۴۴۹۵۰ کیلووات ساعت می باشد.



تصویر ۴۱- میزان تولید برق در مدرسه شکوه

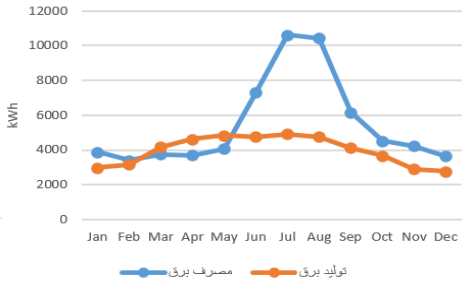
Figure 41- Solar electricity generation in Shokouh School



تصویر ۴۲-محل قرارگیری نیروگاه خورشیدی در پشت بام مدرسه شکوه

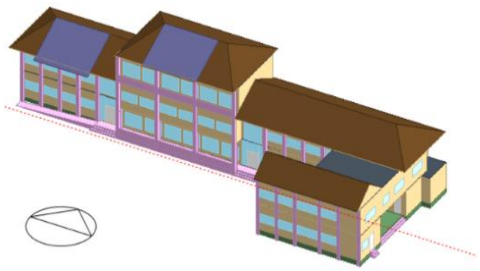
Figure 42- Location of the solar power plant installation on the roof of Shokouh School

با استفاده از نیروگاه خورشیدی کل تولید برق در مدرسه نوشیروانی برابر ۴۷۶۲۲ کیلووات ساعت و کل مصرف برق مدرسه برابر ۶۵۶۶۵ کیلووات ساعت می باشد.



تصویر ۴۳-بررسی میزان تولید برق در مدرسه نوشیروانی

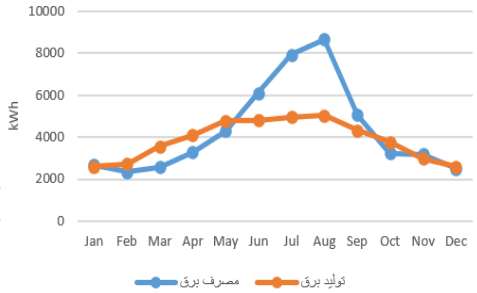
Figure 43- Assessment of solar electricity generation in Noshirvani School



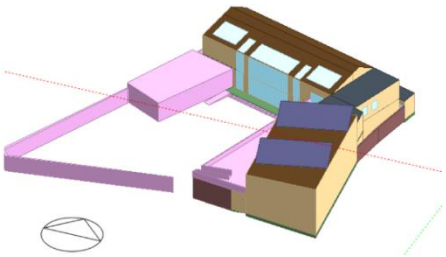
تصویر ۴۴-محل قرارگیری نیروگاه خورشیدی در پشت بام مدرسه نوشیروانی

Figure 44- Solar power plant placement on the roof of Noshirvani School

در حالت بهینه با استفاده از نیروگاه خورشیدی کل تولید برق در مدرسه شهرابی برابر ۴۶۴۸۵ کیلووات ساعت و کل مصرف برق مدرسه برابر ۵۱۷۹۸ کیلووات ساعت می باشد.



تصویر ۴۵-بررسی میزان تولید برق در مدرسه شهرابی
Figure 45- Assessment of solar electricity generation in Shahrabi School



تصویر ۴۶-محل قرارگیری نیروگاه خورشیدی در پشت بام
Figure 46- Location of the solar power plant on

این گزارش به ارزیابی اقتصادی نصب سامانه فتوولتائیک پشت‌بامی با ظرفیت ۳۰ کیلووات در چهار مدرسه (برکت، شکوه، نوشیروانی و شهرابی) می‌پردازد. تحلیل هزینه-فایده بر اساس هزینه‌های اولیه، هزینه‌های عملیاتی، منافع مستقیم (صرفه‌جویی در قبض برق) و منافع اجتماعی) کاهش انتشار (CO_2) انجام شده است. شاخص‌های کلیدی نظیر دوره بازگشت سرمایه، ارزش فعلی خالص(NPV) ، نرخ بازده داخلی (IRR) و نسبت منافع به هزینه‌ها (BCR) محاسبه گردیده‌اند. نرخ ارز ۱۹۰،۰۰۰ تومان به ازای هر دلار در تمام محاسبات مربوط به ارزش‌گذاری کاهش آلایندگی لحاظ شده است. جدول زیر پارامترهای پایه و مفروضات اصلی تحلیل را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲- فرضیات کلیدی و پارامترهای پایه تحلیل
Table 12- Key Assumptions and Baseline Parameters

پارامتر	مقدار
دوره تحلیل	**۲۰ سال**
نرخ تنزیل	**۵٪ سالانه**
قیمت برق (میانگین)	**۲،۰۳۶،۹۱ ریال = ۲۰۳،۶۹۱ تومان/kWh**
هزینه انتشارCO_2	**۵۰ دلار/تن = ۹،۵۰۰،۰۰۰ تومان/تن (با نرخ ۱ دلار = ۱۹۰،۰۰۰ تومان)**
تولید انرژی سالانه (میانگین چهار مدرسه)	**۴۷،۵۹۵ کیلووات‌ساعت**
کاهش انتشار CO_2 سالانه	**ضریب انتشار ۰،۵۸ کیلوگرم → ۲۷،۶/kWh تن در سال (حدود ۲۸ تن)**
هزینه احداث هر کیلووات ظرفیت	**۲۲،۵ میلیون تومان**
هزینه نگهداری سالانه	**۲٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه**
نرخ تبدیل ارز	**۱ دلار = ۱۹۰،۰۰۰ تومان**

هزینه‌های پروژه شامل سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های نگهداری سالانه است. با اعمال نرخ تنزیل ۵٪ و ضریب ارزش فعلی سالیانه ۱۲،۴۶۲ (برای ۲۰ سال)، هزینه‌ها به ارزش فعلی تبدیل شده‌اند.

جدول ۱۳- برآورد هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری (ارزش فعلی)
Table 13- Investment and Maintenance Costs (Present Value)

نوع هزینه	مقدار (تومان)	ارزش فعلی (۲۰ سال، ۵٪ تنزیل، ضریب ۱۲،۴۶۲)
هزینه احداث ۳۰ کیلووات	۶۷۵،۰۰۰،۰۰۰	۶۷۵،۰۰۰،۰۰۰
هزینه نگهداری سالانه	۱۳،۵۰۰،۰۰۰ در سال	۱۶۸،۰۰۰،۰۰۰~
جمع کل هزینه‌ها (ارزش فعلی)		۸۴۳،۰۰۰،۰۰۰~ تومان

منافع پروژه از دو منبع اصلی ناشی می‌شود: صرفه‌جویی مستقیم در قبض برق مصرفی مدرسه و ارزش‌گذاری اقتصادی کاهش انتشار گاز CO_2 به عنوان منفعت اجتماعی.

جدول ۱۴- برآورد منافع ناشی از صرفه‌جویی برق و کاهش آلایندگی (ارزش فعلی)
Table 14- Benefits from Electricity Savings and Emission Reduction (Present Value)

نوع فایده	محاسبه سالانه	ارزش فعلی (۲۰ سال، ضریب ۱۲,۴۶۲)
صرفه‌جویی برق	۴۷,۵۹۵ × ۲۰۳,۶۹۱ = ۹,۶۹۴,۰۰۰ تومان	~۱۲۰,۸۰۰,۰۰۰ تومان
کاهش CO_2	۲۸ تن × ۹,۵۰۰,۰۰۰ = ۲۶۶,۰۰۰,۰۰۰ تومان	~۳,۳۱۴,۹۰۰,۰۰۰ تومان
کل فواید (ارزش فعلی)		~۳,۴۳۵,۷۰۰,۰۰۰ تومان

با استفاده از ارقام ارزش فعلی هزینه‌ها و منافع، شاخص‌های کلیدی محاسبه شده و در جدول زیر ارائه گردیده است.

جدول ۱۵- شاخص‌های اصلی توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه
Table 15- Main Economic Feasibility Indicators

شاخص	مقدار
ارزش فعلی خالص (NPV)	~۲,۵۹۲,۷۰۰,۰۰۰ تومان
نرخ بازده داخلی (IRR)	~۳۸٪
نسبت فایده به هزینه (BCR)	٤,۰۷
دوره بازگشت سرمایه ساده	~۲,٦ سال

با وجود تولید انرژی متفاوت در هر مدرسه، به دلیل غالب بودن ارزش منافع زیست‌محیطی (که برای همه مدارس یکسان است)، دوره بازگشت سرمایه در همه مدارس تقریباً مشابه و حدود ۲,۴۵ سال برآورد می‌شود.

جدول ۱۶- مقایسه عملکرد اقتصادی مدارس مورد مطالعه (نتایج تفکیکی)
Table 16- Comparative Economic Performance of the Studied Schools (Disaggregated Results)

مدرسه	تولید سالانه (kWh)	صرفه‌جویی برق سالانه تومان	کاهش CO_2 سالانه تومان	کل فایده سالانه تومان	بازگشت سرمایه (سال)
برکت	۴۷,۷۵۰	۹,۷۲۶,۰۰۰	۲۶۶,۰۰۰,۰۰۰	۲۷۵,۷۲۶,۰۰۰	~۲,۴۵
شکوه	۴۸,۵۲۱	۹,۸۸۳,۰۰۰	۲۶۶,۰۰۰,۰۰۰	۲۷۵,۸۸۳,۰۰۰	~۲,۴۵
نوشیروانی	۴۷,۶۲۲	۹,۷۰۰,۰۰۰	۲۶۶,۰۰۰,۰۰۰	۲۷۵,۷۰۰,۰۰۰	~۲,۴۵
شهرابی	۴۶,۴۸۵	۹,۴۶۶,۰۰۰	۲۶۶,۰۰۰,۰۰۰	۲۷۵,۴۶۶,۰۰۰	~۲,۴۵

علاوه بر منافع کمی‌شده فوق، اجرای این سامانه‌ها مزایای غیرمستقیم قابل‌توجهی نیز به همراه دارد که در ذیل تشریح می‌شود:

-کاهش هزینه‌های جاری مدرسه :تأمین بخش قابل‌توجهی از برق مصرفی، هزینه‌های عملیاتی را به شدت کاهش داده و بودجه مدرسه را برای سایر فعالیت‌های آموزشی آزاد می‌کند.

-پایداری زیست‌محیطی و ارتقای اعتبار مدرسه :کاهش حدود ۲۸ تن CO_2 در سال، به بهبود کیفیت محیط زیست کمک کرده و مدرسه را به عنوان نهادی پیشرو در توسعه پایدار معرفی می‌نماید.

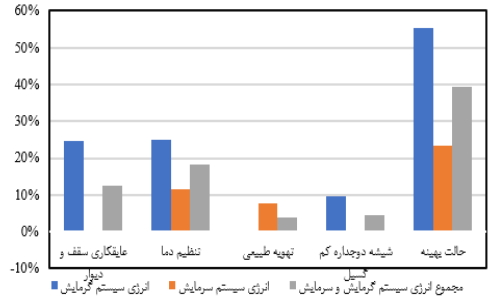
-آموزش و فرهنگ‌سازی :وجود سامانه خورشیدی، بستری عملی برای آموزش دانش‌آموزان در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، تغییر اقلیم و مسئولیت اجتماعی فراهم می‌آورد.

-استقلال انرژی :کاهش وابستگی به شبکه برق در ساعات اوج مصرف و افزایش پایداری تأمین انرژی مدرسه، به ویژه در زمان‌های قطعی یا نوسان برق.

نصب سامانه فتوولتائیک ۳۰ کیلوواتی در مدارس مورد مطالعه، با فرض قیمت برق ۲۰۳,۶۹۱ تومان بر کیلووات‌ساعت و نرخ دلار ۱۹۰،۰۰۰ تومان) برای ارزش‌گذاری کاهش(CO_2) ، از منظر اقتصادی بسیار توجیه‌پذیر و سودآور است. ارزش فعلی خالص مثبت بیش از ۲,۵ میلیارد تومان، نرخ بازده داخلی حدود ٪۳۸، نسبت فایده به هزینه ۰۷.۴ و دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۲,۶ سال، همگی نشان‌دهنده جذابیت بالای سرمایه‌گذاری در این پروژه‌ها هستند.در مقایسه با تحلیل قبلی با نرخ دلار ۱۰۰،۰۰۰ تومان که در آن IRR حدود ٪۲۲ و بازگشت سرمایه ~۴,۵ سال بود، افزایش نرخ ارز به ۱۹۰،۰۰۰ تومان، ارزش منافع زیست‌محیطی را به طور چشمگیری افزایش داده و دوره بازگشت سرمایه را تقریباً به نصف کاهش داده است. این امر نشان می‌دهد که در شرایط اقتصادی فعلی کشور، با لحاظ کردن ارزش واقعی کاهش آلایندگی‌ها، سرمایه‌گذاری در انرژی خورشیدی نه تنها توجیه‌پذیر، بلکه بسیار سودآور خواهد بود.

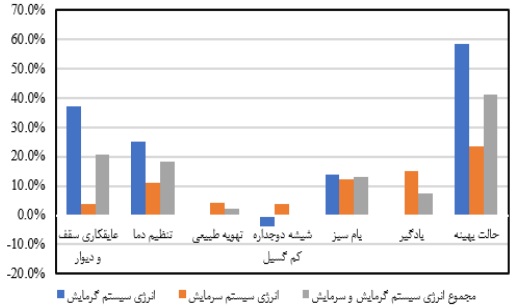
٤-نتایج در حالت بهبود کلی

در بررسی های انجام شده هر یک از راهکار ها جدا در هر مدرسه بررسی وضعیت شد و در نهایت در مجموع همه آنها باهم ارزیابی شده اند که چقدر توانسته اند بر مصرف انرژی تاثیر گذار باشند.



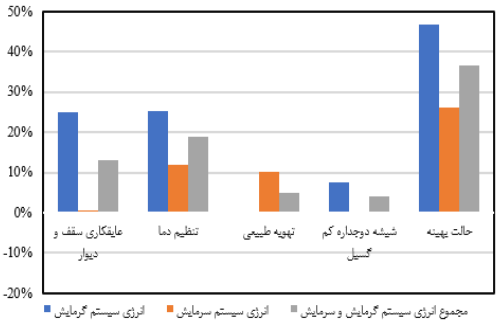
تصویر ۴۷-درصد بهینه سازی راهکارهای مختلف در مدرسه برکت

Figure 47- Optimization percentage of different strategies in Bonyad-e-Barekat School



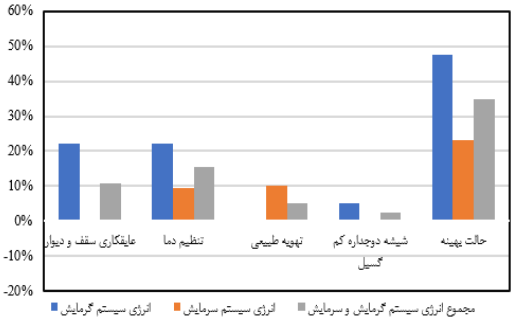
تصویر ۴۸درصد بهینه سازی راهکارهای مختلف در مدرسه شکوه

Figure 48- Energy saving percentage of different strategies in Shokouh School



تصویر ۴۹-درصد بهینه سازی راهکارهای مختلف در مدرسه نوشیروانی

Figure 49- Energy saving percentage of different strategies in Noshirvani School



تصویر ۵۰-درصد بهینه سازی راهکارهای مختلف در مدرسه شهرابی

Figure 50- Energy saving percentage of different strategies in Shahrabi School

در بررسی‌های پیشین، تأثیر هر یک از راهکارهای بهینه‌سازی (عایق‌کاری، تنظیم دما، تهویه طبیعی، پنجره‌های کم‌گسیل و پنل‌های خورشیدی) به‌صورت مجزا بر مصرف انرژی هر چهار مدرسه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این

مرحله، کلیه راهکارها به‌صورت همزمان بر روی مدل‌های شبیه‌سازی اعمال شده‌اند تا اثر ترکیبی و تداخلی آن‌ها در اقلیم معتدل-مرطوب بابل مورد سنجش قرار گیرد. لازم به ذکر است که در حالت ترکیبی، پنل‌های خورشیدی ۳۰ کیلوواتی (با مساحت ۱۶۰ مترمربع و راندمان ٪۱۹) نیز لحاظ شده و تولید برق خورشیدی از کل مصرف برق شبکه کسر گردیده است. نتایج شبیه‌سازی ترکیبی در جدول ۱۱ به‌صورت کمّی گزارش شده است. ارقام بر حسب کیلووات‌ساعت در سال و درصد کاهش نسبت به حالت پایه لحاظ شده است.

جدول ۱۷ – نتایج ترکیبی راهکارهای بهینه‌سازی در چهار مدرسه مورد مطالعه

Table 17– Combined Optimization Strategy Results for the Four Case Study Schools

مدرسه	مصرف کل انرژی (حالت پایه)	مصرف کل انرژی (حالت ترکیبی بهینه)	کاهش مطلق انرژی	درصد کاهش کل انرژی
بنیاد برکت	۶۸،۸۳۲	۵۳،۵۵۰	۱۵،۲۸۲	٪۲۲,۲
شکوه	۸۱،۸۶۵	۶۲،۱۴۰	۱۹،۷۲۵	٪۲۴,۱
نوشیروانی	۱۰۸،۷۶۲	۸۲،۹۶۰	۲۵،۸۰۲	٪۲۳,۷
شهرابی	۸۸،۰۴۳	۶۶،۸۳۰	۲۱،۲۱۳	٪۲۴,۱

همان‌طور که در جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، درصد کاهش کل انرژی در حالت ترکیبی بین ۲۲ تا ۲۴ درصد متغیر است. این میزان در مقایسه با مجموع اثرات مجزا کاهش یافته است که نشان‌دهنده‌ی وجود تداخل و هم‌پوشانی عملکردی بین راهکارها در شرایط اقلیمی و عملیاتی واقعی است. با این وجود، کاهش ۲۲ تا ۲۴ درصدی مصرف انرژی در کنار تأمین بخش عمده‌ای از برق مصرفی از طریق پنل‌های خورشیدی، دستاوردی بسیار مطلوب محسوب می‌شود و می‌تواند نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کند. همچنین، ترکیب راهکارها منجر به افزایش ساعات آسایش حرارتی در فصول گرم و سرد سال گردید که نشان از بهبود همزمان عملکرد انرژی و کیفیت محیط داخلی دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد انرژی در چهار مدرسه نوساز شهر بابل و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که شاخص مصرف انرژی کل در مدارس موردمطالعه بین ۵۸,۸ تا ۶۶ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال متغیر است. بر اساس پیوست ۳ مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان در اقلیمA3 ، حد مجاز مصرف انرژی برای دبستان در رده‌های A تا D به‌ترتیب ۳۲، ۶۴، ۹۵ و ۱۲۷ و برای دبیرستان ۳۹، ۷۹، ۱۱۸ و ۱۵۷ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در سال تعیین شده است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدرسه نوشیروانی (دبستان، ۵۸,۸) در رده Bو مدرسه شکوه (دبستان، ۶۶) در رده Cقرار می‌گیرد. همچنین مدارس برکت و شهرابی (دبیرستان، ۶۳,۵ و ۶۰) هر دو در رده Bجای می‌گیرند. برای دستیابی به رده A، مدارس ابتدایی نیازمند کاهش ۴۵ تا ۵۲ درصدی و مدارس متوسطه نیازمند کاهش حدود ۳۸ درصدی مصرف انرژی هستند که با به‌کارگیری راهکارهای پیشنهادی شامل عایق‌کاری، تنظیم دمای سیستم‌ها، تهویه طبیعی، پنجره‌های کم‌گسیل و پنل‌های خورشیدی قابل‌تحقق است.

-**عایق‌کاری سقف و دیوار :**استفاده از عایق پلی‌استایرن با ضخامت ۳ سانتی‌متر منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت دیوارها (تا ٪۲۹) و سقف‌ها (تا ٪۳۹) شد. این راهکار مصرف انرژی سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی را بین ۱۱ تا ۲۰,۷درصد کاهش داد.

-**تنظیم دما :**تنظیم دمای سیستم سرمایش به ۲۵ درجه و گرمایش به ۲۱ درجه سانتی‌گراد، مصرف انرژی سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی را بین ۱۶ تا ۱۹ درصد کاهش داد، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر قابل‌توجه مدیریت دمایی بر بهره‌وری انرژی است.

-**تهویه طبیعی :**بهره‌گیری از تهویه طبیعی با بازشوی ۵۰ درصدی پنجره‌ها در فصول گرم و معتدل، مصرف انرژی سیستم سرمایش را بین ۴,۴ تا ۱۰ درصد کاهش داد.

-**پنجره‌های دوجداره کم‌گسیل :**استفاده از این نوع پنجره‌ها به کاهش تابش دریافتی و مصرف انرژی گرمایشی (تا ۱۰٪) منجر شد. بررسی تأثیر شیشه‌های کم‌گسیل در اقلیم معتدل مرطوب بابل نشان می‌دهد که عملکرد این راهکار به تعادل بین کاهش بار سرمایش تابستان و افزایش احتمالی بار گرمایش زمستان بستگی دارد. کاهش همزمان ضریب انتقال حرارت و ضریب کسب حرارت خورشیدی، اگرچه در تابستان از ورود گرمای اضافی جلوگیری می‌کند، اما در زمستان ابری منطقه می‌تواند دریافت گرمای مفید خورشیدی را محدود نماید. بنابراین، انتخاب شیشه با SHGC متوسط (۰,۴–۰,۵) و U-value پایین (زیر ۱,۴ وات بر مترمربع کلوین) برای این اقلیم توصیه می‌شود تا تعادل بهینه بین بهره‌وری انرژی در هر دو فصل برقرار گردد.

-**پنل‌های خورشیدی :**نصب پنل‌های خورشیدی با ظرفیت ۳۰ کیلووات، بخش قابل‌توجهی از نیاز برق مدارس (تا ۱۰۰٪ در مدرسه برکت و شکوه) را تأمین کرد و وابستگی به شبکه برق را کاهش داد. در تکمیل یافته‌های فنی، تحلیل اقتصادی کامل هزینه-فایده برای سامانه‌های فتوولتائیک مدارس انجام شد. نتایج نشان داد که با احتساب ارزش کاهش انتشارCO_2 ، این سامانه‌ها از توجیه اقتصادی قوی برخوردارند (NPV مثبت ~۲,۵ میلیارد تومان، IRR ~ ۳۸٪ و بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال) . بنابراین، توسعه انرژی خورشیدی در مدارس، افزون بر مزایای زیست‌محیطی و آموزشی، یک فرصت سرمایه‌گذاری سودآور محسوب می‌شود و می‌تواند مبنای سیاست‌گذاری کلان انرژی در بخش آموزش قرار گیرد. همچنین تأکید می‌شود که نادیده‌گرفتن منافع غیرمستقیم، تحلیل اقتصادی را ناقص و گمراه‌کننده می‌کند؛ ازاین‌رو، ارزش‌گذاری صحیح این منافع در تصمیم‌گیری‌های کلان ضروری است.

بررسی اثرات متقابل (تداخلی) راهکارها در اقلیم بابل

نکته‌ی حائز اهمیت در نتایج ترکیبی، کاهش درصد صرفه‌جویی نسبت به جمع جبری اثرات مجزا است که ناشی از تعاملات حرارتی بین راهکارها در اقلیم معتدل-مرطوب بابل می‌باشد. اگرچه عایق‌کاری بار سرمایش و گرمایش را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد، اما در روزهای گرم و مرطوب تابستان، در صورت عدم تهویه مناسب، می‌تواند به محبوس شدن گرما و رطوبت در فضا منجر شده و دمای داخلی را افزایش دهد؛ با این حال، در پژوهش حاضر، تهویه طبیعی به‌صورت همزمان با عایق‌کاری لحاظ شده و شبیه‌سازی نشان داد که بازشوی ۵۰ درصدی پنجره‌ها در ساعات خنک شبانه‌روز (زمانی که دمای بیرون کمتر از داخل است) می‌تواند هوای گرم انباشته‌شده را تخلیه کرده و از افزایش بیش‌ازحد دما جلوگیری کند. بنابراین ترکیب عایق‌کاری و تهویه طبیعی در این اقلیم، علی‌رغم تداخل جزئی در ساعات اوج گرما، به‌صورت مکمل عمل می‌کند. همچنین، افزایش دمای تنظیم سرمایش از ۲۴ به ۲۵ درجه با عایق‌کاری هم‌جهت است و ضمن کاهش بار محسوس، بار نهان (رطوبت‌زدایی) را نیز کاهش می‌دهد. پنجره‌های کم‌گسیل با وجود محدود کردن دریافت گرمایش مفید در زمستان، در مجموع مصرف گرمایش را تا ۱۰ درصد کاهش داده‌اند. در نتیجه، علی‌رغم کاهش ۲۲ تا ۲۴ درصدی انرژی در حالت ترکیبی (که کمتر از مجموع اثرات مجزا است)، ترکیب متوازن این راهکارها همچنان کارایی بسیار مطلوبی داشته و نشان‌دهنده‌ی ضرورت طراحی هماهنگ راهکارها با ویژگی‌های اقلیمی مرطوب منطقه است.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیبی از راهکارهای عایق‌کاری، تنظیم دما، و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند به طور مؤثری مصرف انرژی را کاهش داده و شرایط آسایش حرارتی را بهبود بخشد. با توجه به اقلیم معتدل و مرطوب

بابل، تأکید بر تهویه طبیعی و استفاده از مصالح با عملکرد حرارتی بالا می‌تواند به‌عنوان استراتژی‌های کلیدی در طراحی و نوسازی مدارس مورد توجه قرار گیرد. نتایج این پژوهش نه‌تنها برای شهر بابل، بلکه برای سایر مناطق با اقلیم مشابه در ایران و جهان قابل‌تعمیم است و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای توسعه پایدار در بخش ساختمان‌های آموزشی مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، تأثیر ترکیبی این راهکارها به‌صورت یکپارچه بررسی شود و اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی آن‌ها با جزئیات بیشتری تحلیل گردد. همچنین، توجه به آموزش کاربران و مدیران مدارس در راستای بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های انرژی و نگهداری صحیح تجهیزات می‌تواند به پایداری نتایج کمک کند. این مطالعه گامی در جهت تحقق اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی در بخش آموزش است و می‌تواند به سیاست‌گذاری‌های کلان در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایران یاری رساند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل توضیح داده شده از سوی مجله، مورد تأیید نویسندگان این مقاله است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر فاقد حمایت مالی است.

سپاسگزاری

از کلیه کسانی که در مراحل مختلف نوشتن این مقاله با نظرات خود ما را یاری دادند، سپاسگزاری می‌کنیم.

References:

1.Ahmadi Soleimani, S. M., Eshraghi, M., & Zomorodian, Z. S. (2020). Optimization of energy consumption in educational buildings: A case study of Shahid Beheshti University. *Soffeh*, 32(3), 49-65. https://doi.org/10.52547/sofeh.32.3.49 [In Persian]

2.Bahalou-Houreh, N., & Borghei, S. M. R. (2023). Energy optimization of an educational building in Tehran with different configurations of windows, curtains, lighting system and temperature regulation along with economic analysis. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, *11*(1), 29-44. 10.22061/jsaud.2023.9529.2118 [In Persian]

3.Jahangir, M. H., & Rashidi, R. (2022). Optimization of energy consumption in an educational building using physical scenarios. *Urban Planning and Regional Development*, 1(1), 73-88. 10.22034/jprd.2022.15046 [In Persian]

4.Ghanbaran, A., & Hosseinpour, M. A. (2016). Investigating the effective factors on energy efficiency in educational spaces in the climate of Tehran. *Naqsh-e Jahan - Theoretical Studies and New Technologies in Architecture and Urban Planning*, 6(3), 51-62. 20.1001.1.23224991.1395.6.3.3.5 [In Persian]

5.Azmouti, S., Haji Razaghi, S., & Tahersima, S. (2023). The effectiveness of hot water collectors and solar cells on heating and reducing energy consumption in elementary schools of Urmia, case study: A girls' elementary school in Urmia. *Armanshahr*

Architecture & Urban Development, 16(43), 153-176. https://doi.org/10.22034/aaud.2023.338109.2651 [In Persian]
6.Soltani Nejad, Z., Ghasemi, M., & Soltani Nejad, M. (2024). Technical and environmental analysis of using a photovoltaic-thermal system to supply heating energy for a school building in Kerman. *Journal of Renewable and New Energy*, 11(1), 50-59. https://doi.org/10.22034/jrenew.2023.184649 [In Persian]
7.Díaz-López, C., Serrano-Jiménez, A., Lizana, J., López-García, E., Molina-Huelva, M., & Barrios-Padura, Á. (2022). Passive action strategies in schools: A scientific mapping towards eco-efficiency in educational buildings. *Journal of Building Engineering*, 45, Article 103598. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103598
8.Granados-López, D., Gatt Almaziad, D., Yousif, C., Díez-Mediavilla, M., & Alonso-Tristán, C. (2023). Exploitation of indoor illumination for typical flat dwellings in the Mediterranean area. *Energy Reports*, 9, 1473–1489. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.050
9.Islam, M. H., Safayet, M. A., & Al Mamun, A. (2024). Building performance analysis for optimizing the energy consumption of an educational building. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 42(4), 576–595. https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2022-0026
10.Jia, L. R., Han, J., Chen, X., Li, Q. Y., Lee, C. C., & Fung, Y. H. (2021). Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review. *Buildings*, 11(12), Article 591. https://doi.org/10.3390/buildings11120591
11.Liu, Y., Chen, H., Zhang, L., & Feng, Z. (2021). Enhancing building energy efficiency using a random forest model: A hybrid prediction approach. *Energy Reports*, 7, 5003–5012. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.07.053
12.Park, B., & Lee, S. (2020). Investigation of the energy saving efficiency of a natural ventilation strategy in a multistory school building. *Energies*, 13(7), Article 1746. https://doi.org/10.3390/en13071746
13.Park, H., Yeo, S.-H., Jeong, H., Kim, S., & Chang, S. J. (2025). Optimizing energy efficiency and sustainable utilization of national heritage through the remodeling of closed school buildings. *Energy and Buildings*, 328, Article 115168. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115168
14.Parvin, K., Hossain, M. J., Arsad, A. Z., Ker, P. J., & Hannan, M. A. (2025). Building energy technologies towards achieving net-zero pathway: A comprehensive review, challenges and future directions. *Journal of Building Engineering*, 92, Article 111795. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111795
15.Sayed Hassan Abdollah, A. (2023). Improved energy consumption and smart eco system for mosques in hot arid climates. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), Article 101811. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101811
16.Zhen, X., Li, S., Peng, J., Zhao, Z., Zhang, X., Tan, C., & Wu, W. (2025). Analysis of building envelope for energy consumption and indoor comfort in a near-zero-energy building in Northwest China. *Results in Engineering*, 24, Article 104243. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.104243
17.Gao, M., Zhang, L., Zhang, H., & Wang, W. (2022). Research on the influence of different heating strategies on energy consumption and carbon emission of a teaching building in Urumqi. Energy Reports, 8, 318-326 https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.028

18.Mojtabavi, S. M., & Izadpanah, H. (2022). Investigation of Physical Components of Sustainable Architecture in Educational Space (Case Study: François Mitterrand School, Brazil). Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS), 3(2), 135–155. https://www.srds.ir/article_155649.html[In Persian]

OPEN ACCESS

COPYRIGHTS

© The Author(s). This is an open access article under the CC BY-NC license:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Publisher: *Private with Cooperation Iranian Geography and Urban Planning Association.*